C.サットン 著
鈴木厚人 訳

ニュートリノでめぐる素粒子・宇宙の旅

Spaceship Neutrino

Springer
シュプリンガー・ジャパン

Translation from the English language edition:
Spaceship Neutrino
by Christine Sutton

緒言

私は恐ろしいことをしてしまった．検出できない素粒子の存在を主張してしまったのだ．

W. パウリ

パウリよ，フェルミよ，
　私たちの幻覚を追い払い，
　私たちの直感を鋭敏にし
良識ある結論へと私たちを導きたまえ．

ヴォルフガング・パウリがニュートリノ仮説を提唱し，エンリコ・フェルミが見事なニュートリノ理論を構築したころ，ニュートリノが宇宙の秘密を解き明かす実り多き知識を与えてくれることになろうとは，誰も想像さえできなかった．ベータ崩壊において，見かけ上エネルギー/運動量が保存されないことが明らかになり，それに対する「言い訳」としてはじめは導入されたニュートリノは，検出するのが困難なほどの相互作用の弱さのおかげで，星の内部を探索する唯一の手段に使われるようになったのである．

この「ポルターガイスト（音の精）」を現実のものとすることが困難であることは，H. A. ベーテと R. E. パイエルスによって大筋が示された．二人はフェルミの理論を用い，鉛の物質中を数光年の距離を走ってやっと反応を起こすほどの微小な相互作用であることを計算によって示した．1934 年当時利用できたニュートリノ発生源と検出器では，ニュートリノの検出はまったく不可能であると考えられた．

二つの実験技術の発展の結果が，この状況を劇的に変化させた．すなわち，

核分裂の発見と，大型の液体シンチレーション検出器の開発である．検出器の能力が増し，さらにニュートリノのフラックスを一挙に増やすことができるようになり，1 日あたり数個のニュートリノ反応率が予測でき，ニュートリノの存在を決定づける一連の実験が実現した（クライド・コーワンとフレッド・ライネスによる）．

1956 年には，リー，ヤン，ウーらの連携によってパリティが保存されないことが発見された．そして，この結果からニュートリノの反応率（反応断面積）を 2 倍大きくしなければならないことが要請され，実験の精度が向上した証となった．もし，このニュートリノが単独で検出されていなかったら，弱い相互作用におけるパリティ非保存に対し，物理学者たちがどのような対応をしただろうかと想像してみるのも面白いだろう．

ニュートリノの存在が示された以上，ニュートリノの性質，たとえば静止質量，磁気能率，ニュートリノと反ニュートリノの同等性，電子・ニュートリノとミュー・ニュートリノの同一性，安定性（寿命）などなどを調べようとするのは当然であった．そしてこのような課題は，まさに今日の素粒子物理学者や宇宙物理学者に興味を引き付けてやまないテーマとなっている．

この本の中で述べられているように，ニュートリノ物理は原子炉から加速器，さらには宇宙線，太陽，超新星にまで及ぶ広範囲のニュートリノ源を対象として，非常に活気に満ちた研究分野となっている．さらに諸君は，ニュートリノと素粒子物理の多くの部分との結びつきの深さを目の当たりにすることであろう．

F. ライネス

まえがき

ニュートリノは私にとってこの上もなく魅力的である．ニュートリノは，すべての素粒子の中でもっとも信じがたく，矛盾に満ちて，謎めいていて，これ以上何と形容してよいのか言葉が見つからない．矛盾に満ちているといえば，何といっても，ニュートリノは非常に小さく（軽く），また検出するのが困難であるにもかかわらず，物理学者にとてつもなく重要な情報をもたらしてきたということであろう．まさしく，素粒子物理学を述べるのに，ニュートリノから出発してすべてを尽くすことさえ可能であろう．しかしそのためには，何巻もの書物が必要である（書き終えるのに，私は家族にどのくらい忍耐をお願いしないといけないことやら）．本書では，私が興味を覚えたさまざまな話題にしぼってニュートリノの姿をお伝えしよう．特に，理論的な考察よりもニュートリノ研究の実験に重きをおいた．なぜなら，ニュートリノについて何がわかっているか，そしてどのようにしてわかったのかを中心的なテーマとしたいからである．であるから，ニュートリノ研究者なら誰でも，重要な事項の説明がしばしば不十分であったり抜け落ちたりしていることさえあるという感想を抱かれるであろうことは申し上げておかねばならない．

また私は，自分自身がニュートリノ実験にかかわったことがないという意味において，常にニュートリノに関心を抱きつづけたというわけではない，ということも付け加えておこう．しかし，私はこの欠点を，世界中にわたる大勢の専門家からご助力をいただくことによって克服しようと努めてきた．当初の見通しよりはるかに長い時間がかかったが，このような方々の貴重なご助言と暖かい励ましのおかげで何とか執筆を完了することができた．以下に，

お名前を挙げて感謝の言葉をささげたい．現代の素粒子物理学の研究論文と同様，そのリストは長く，アルファベット順である．

Finn Aeserud (Niels Bohr Archive)
John Bahcall (Institute for Advanced Study, Princeton)
Milla Baldo-Ceolin (University of Padva)
Ralph Becker-Szendy (University of Hawaii)
Norman Booth (Oxford University)
David Caldwell (University of California, Santa Barbara)
Donald Gundy (CERN)
George Ewan (Queen's University, Ontario)
David Faust (SLAG)
Gordon Eraser (CERN)
Georgio Giacomelli (University of Bologna)
Maurice Goldhaber (Brookhaven National Laboratory)
Marjorie Graham (American Institute for Physics)
Petra Harms (DESY)
Nigel Henbest (Hencoup Enterprises)
E. Holzchuh (University of Zurich)
Cecilia Jarlskog (University of Stockholm)
Henry Kendall (MIT)
Till Kirsten (Max-Planck Institut fur Kernphysik, Heidelberg)
Maso-Toshi Koshiba (Tokai University)
Walter Kundig (University of Zurich)
John Learned (University of Hawaii)
Leon Lederman (University of Chicago)
Michael Moe (University of California, Irvine)
John Mulvey (Oxford University)
Gerald Myatt (Oxford University)
Martin Perl (SLAG)
Roger Phillips (Rutherford Appleton Laboratory)
Bruno Pontecorvo (JINR Dubna)
Roswitha Rahmy (CERN)
Frederick Reines (University of California, Irvine)
Fred Rick (Los Alamos National Laboratory)
Michael Riordan (SLAG)
Subir Sarkar (Oxford University)
Janet Sillas (Brookhaven National Laboratory)

Brian Southworth (CERN)
Bernhard Spaan (DESY)
Christian Spiering (Institut fur Hochenergiephysik, Zeuthen)
David Wark (Oxford University)
Richard West (ESO)
Stan Woosley (University of California, Santa Cruz)

貴重な資料を閲覧させていただいた，以下の施設の図書館にも感謝したい．CERN, Rutherford Appleton Laboratory, Oxford University Nuclear Physics Laboratory, Oxford の Bodlean Library．また，Oxford の Physics Department の Photographic Group のご助力にも感謝する．最後に，Rockefeller University の Dino Goulianos との会話から本書のタイトルについてインスピレーションを得たことに対し，彼に感謝の言葉を述べたい．そして，テリーとスティーブ，長い間「ママのお勉強」に付き合わせてごめんなさい．

目　次

第1章
はじめに

ニュートリノ物理学とは，なにも検出されないことから多くのことを学ぶ学問である.[1]

ハイム・ハラリ，1988.

1987 年 2 月 23 日，天の川銀河系の外から，秘宝をたずさえた 10 億のそのまた 10 億倍ものおびただしい数の使者の一団が地球を駆け抜けた．そして，そのうちのわずかが我々の岩惑星にとどまったが，残りの大集団はそのままなにもなかったかのように直進し，宇宙空間への旅を続けた．

その使者とはニュートリノであった．ニュートリノは，実験からほとんどなにもその素性が明らかにされていない，虚無よりもわずかに実在性を帯びた素粒子である．とはいえ，ニュートリノは宇宙空間に存在する物質の主要な要素であり，その数は我々にもっと身近な物質である原子の量と比べて，10 億倍も多い．例えば，我々の宇宙の誕生を演出した爆発現象，すなわちビッグ・バンによって作られたニュートリノは，現在の宇宙空間のどの単位体積をとってみても，その中に満ちている．また，太陽は地上に太陽光を降り注ぐかのように，ニュートリノを浴びせている．それを捕らえるようと手を差し出せば，昼夜を問わず毎秒 10 兆個のニュートリノがその中を通り抜ける．

太陽に似た星（恒星）のすべてはニュートリノを放出するが，1987 年初頭に天の川銀河系外から地球にやってきたニュートリノの一団は，別の特殊な現象として注目された．約 17 万年前に大マゼラン雲と呼ばれる天の川銀河のとなりの天体で，太陽より約 20 倍も大きい星が劇的な爆発を伴って死を

むかえ，宇宙空間の四方八方に原子核や素粒子からなる星の残骸を吹き飛ばした．1987年2月23日，爆発の最初の信号が地球に届いた．それは，遠方の星の死を知らせる一報を届けてくれる無数のニュートリノであった．その数時間後には南半球の天文学者が，超新星SN1987Aの出現を告げる爆発によって生じた最初の閃光を観測した．SN1987Aはこの400年間に，肉眼で観測できた初めての超新星爆発であった．

この超新星爆発からのニュートリノのうちのわずか十数個を検出したことが，観測的天文学の新しい研究分野の創始という記念碑を建てた．その上，極微の世界，すなわち物質の究極像を探求する素粒子物理学者と，極大の世界の宇宙の仕組みを研究する天体物理学者や宇宙物理学者との間に連携プレーがはぐくまれた．このようにニュートリノは，最も古い科学である天文学と最も新しい科学の一つである素粒子物理学との間に，目にはみえないが，強固なかけ橋を築くことになった．天文学は太古の昔にさかのぼる学問であるが，一方の素粒子物理学はごく最近の1950年代初めに，原子構造の研究から出発して科学の根幹をなす学問となった．この本中で私の意図することは，いかにしてニュートリノが素粒子物理学の中で先導的役割を演じ，かつ，幾多の興味深い研究テーマをとうして天文学や宇宙論との結合を強めてきたかを紹介することである．

さて，ここで，素粒子物理学の基本的概念に精通している人は，第2章の初めまで読み飛ばしてもかまわない．そうでない人にとっては，この後に続く手短な解説“素粒子物理学におけるニュートリノの役割”が役に立つであろう．読者の中にはニュートリノの世界への旅立ちを前に，ニュートリノについての何らかの予備知識を与えてもらう方が，理解の手助けになると考えている人がいるかもしれないが，私は後の章のそれぞれ適切な箇所で必要な概念を紹介することにする．

20世紀に入って始めの10年間に，物理学者は原子が中心に正電荷を持つ原子核と呼ばれる小さな粒と，その周りを取囲む負電荷の電子の雲から成り立っていることを発見した．彼らは，さらに原子核の構造についての研究を進め，原子核は後に陽子と呼ばれるようになった正電荷粒子と，中性子と名付けられた中性粒子から作られていることをつきとめた．陽子の電荷量は，電子の電荷量と等しく，正負の釣り合いが保たれている．そのため，電子数と

陽子数が等しい通常の原子は電気的に中性である．しかし，それ以外の多くの性質に関しては，陽子と中性子はまったく電子と異なっている．特に目立つ点は，陽子と中性子が非常に重く，電子の約 2000 倍の質量を持つことである．

我々の身の回りの世界では，陽子と中性子，電子は互いに結合して，90 種類以上もの異なる原子を作っている．そして，それぞれの原子には特定の化学元素が対応している．これらの原子を種にして，異なる原子同士の反応によって化合物ができ，さらに反応の繰り返しから多様性に富んだ地球が生まれた．例えば，水は一定の割合の水素原子と酸素原子より構成されている．一方，生命の源である蛋白質は，数百の原子が結合したはるかに複雑な構造を持っている．

地球上の大多数の物質は極めて安定であるが，ある種の原子はもともと不安定である．これらの原子はエネルギーを放出してほかの原子に壊変することから，放射性能力（放射能）を持つと呼ばれる．原子構造が解明される以前の 19 世紀後半に発見された放射能は，例えば，我々の足元にある地下の岩盤の温度を変化させる自然現象である．

数種類に分類される放射能の基本過程は同じである．つまり，原子核は自発的により低いエネルギー状態に変わる時，差し引き分の余ったエネルギーを放出する．このエネルギーは放射線として姿をあらわす．放射線は，時にはエネルギーの高い光，すなわちガンマー線であり，または，2 個の陽子と 2 個の中性子が安定に結合したアルファー粒子であり，またある時は，電子とニュートリノの粒子対である．このように放射能物質から生れたニュートリノは，無数の群れとなって我々の周囲を飛び交う．

この放射能に関する研究は，1930 年代初めにニュートリノが実在するという最初の予言に発展した．電子の放出を伴う放射性崩壊を調べてみると，一部のエネルギーが消えてしまうと考えざるをえない現象が見つかった．明晰な頭脳の持つオーストリアの理論物理学者，ヴォルフガング・パウリは，電気的に中性で軽量，かつ反応が極端に弱い粒子が崩壊エネルギーの一部を持ち去らなければならないという考えを唱えた．それから 20 年経った後に，ようやくアメリカの研究者達が物質と極めて稀にしか起こらない反応を検出することによって，ついにこれらの粒子の検出に成功した．それからは，太陽



ヴォルフガング・パウリ（1900 − 58）ニュートリノの父（AIP ニールス・ボーア図書，ゴードシュミット所蔵）

や超新星 SN1987A からやってくるニュートリノの観測のみならず，素粒子やそれらに働く力の研究を可能にするニュートリノを用いる実験が始まった．この正体不明の粒子の最も矛盾すると思える一面は，反応を起こすことなくすっと地球を通り抜けてくるように検出が非常に難しいにもかかわらず，素粒子物理学の研究のありとあらゆる局面で極めて重大な知見を提供したことである．

ニュートリノは，自然界における基本的な力の一つである弱い力を媒介にして，時折，他の素粒子と反応することから，かろうじて検出される．この力が，電子とニュートリノの放出を伴う放射性崩壊を引き起こす．原子の内部では，弱い力は荷電粒子間に作用して原子の結合を支える電磁気力と比較して，その 1000 分の 1，また，陽子と中性子をともに原子核の中に閉じ込める強い力の 10 万分の 1 と微弱である．

弱い力がこれほど弱いということは，ニュートリノが他の物質と反応することなく，宇宙スケールの距離を飛び交うことができることを意味している．

しかし，物理学者にとって幸いなことに，ニュートリノの反応過程は我々の一生そのものに似ている．多くの先進国における人々の平均寿命は，少なくとも 70 歳台である．しかしながら，これらの人達の中には，わずか数年で生涯を終える人もいれば，一世紀以上も長生きする人もいる．大型測定器の中を通過するニュートリノはこれと似ている．つまり，ほとんどのニュートリノは測定器中で何の痕跡も残さず通り抜けるとはいえ，測定器内の物質中の粒子と弱い力を介して反応する確率は，小さいながら有限である．素粒子物理学者は，ニュートリノによる弱い相互作用の研究をとうして，ニュートリノそれ自身の性質のみならず，相互作用する相手の素粒子について，さらには，相互作用を引き起こす力について学んだ．

1970 年代，ニュートリノを用いる実験は，相補的役割を担った電子による実験とともに，物質を構成する基本粒子に新しい階層が存在することを突き止めた．陽子や中性子はもはや基本粒子ではなく，より微小な粒子，クォークから作られていることが明らかになった．クォークは陽子や中性子の内部で，強い力によって束縛されている．そして，クォーク単体を，この束縛状態からたたき出すことは不可能であるが，ニュートリノや電子を照射することによって，陽子や中性子の中に存在するクォークを観測することができる．ちょうど，レーダーの反射によって深い霧に覆われた飛行機や船が捕らえられるように，ニュートリノや電子の散乱によって，陽子や中性子の奥底に潜む小さなクォークの振る舞いが探れるのである．

これまで，クォーク自身がさらに内部構造を持つという実験的証拠は存在しない．そのため，クォークが物質の真の基本構成要素であると考えられている．同様に電子やニュートリノも，強い力を感じないという点でのみクォークと異なるだけで，内部構造を持たない点状粒子と見なされている．過去 20 年の間に，これら基本粒子には，強い力を感じるクォークとそうでないレプトンと呼ばれる 2 種類の異なったグループ（“家族”）が存在するという考えが確かになってきた．

ここ地球上における物質の存在は，陽子や中性子を構成する 2 種類のクォークと，放射性崩壊の際に放出される電子と随伴するニュートリノの 2 種類のレプトンによって決定される．しかしながら，1930 年代の昔の宇宙線研究において，自然は地球上で要求される 4 種類の粒子よりもっと多くの粒子を必

要とすることが示唆されていた．宇宙線とは，大気を通して降り注いでくるエネルギーの高い粒子のことであり，ニュートリノやガンマー線もその中に含まれている．地上でのニュートリノの大部分は太陽とか，SN1987A のような突発現象が発生源であるとはいえ，その以外のニュートリノや多くの荷電粒子は，宇宙空間からやってくる陽子を主成分とする超高エネルギー粒子が，大気上空で空気の原子と衝突する際に起こす原子核反応によって生成される．

大気中で作られた荷電粒子の大部分は短寿命で，放射性原子のようにすぐ崩壊する．これらの粒子はわずか数十億分の一秒後により安定な粒子に壊変し，その際に，電子や陽子，ニュートリノが生成される．一方，これらの短寿命粒子は地上においても，制御された実験環境，すなわち粒子加速器を備えた実験室で作り出すことができる．粒子加速器は陽子や電子を粒子ビーム状にし，電場で発生するエネルギーを粒子ビームに転化して，光速近くまで粒子を加速する．このような高エネルギー粒子ビームが物質を直撃すると，ちょうど宇宙線が大気に衝突する時のように，新しい短寿命の粒子が生成される．

これらの短寿命粒子に関する研究から，陽子や中性子を構成するクォークの種類だけでなく，もっと多くの種類のクォークと，電子や電子と対になって生成されるニュートリノよりも，多種類のレプトンの存在が明らかになった．現時点ではあらゆる実験的証拠から，6 種類のクォークと 6 種類のレプトンの存在が指摘されている[注1]．これらレプトンのうち 3 種類は電荷を持ったレプトンであり，電子はこの中に含まれている．残りの 3 種類のレプトンは電気的に中性で，これらはニュートリノと呼ばれている．

これら全ての粒子が引き起こす相互作用は，強い力や弱い力，または電磁気力を介して作用し，標準理論と呼ばれる理論で定式化される．1970 年代に行われた粒子加速器によるニュートリノ実験は，基本粒子であるクォークやレプトンの相互作用を非常にうまく記述する標準理論の確立に重要な役割を果たした．しかし非常に良いとはいえ標準理論は多くの欠点も持っている．例えば，4 番目の基本力である重力を含んでいないだけでなく，クォークやレプトンの質量がいくらであるかという疑問に答えることができない．3 種類

注1　1994 年に米国フェルミ国立加速器研究所で 6 番目のクォークであるトップ・クォークが発見され，6 個の全てのクォークが実験によって実証された．

のニュートリノの質量は，相棒の荷電レプトンよりはるかに小さいが，それらの質量はゼロなのかどうか？ これまでの実験からは，確かなことはなにも言えない[注2]．そして，標準理論もなにも教えてくれない．

素粒子物理学を研究する手段としてのニュートリノの役割はまだ終わっていない．それどころか，ちょうどクォークの性質や弱い力の特性を解明する上で大きな貢献をしたように，標準理論の改良において間違いなく理論家に指針を与えるであろう．また，SN1987A からのニュートリノの検出によって，この注目すべき素粒子は天文学者の研究手段にもなってきている．ニュートリノ望遠鏡はきたる 10 年間に，長年，天体物理学者を悩ましてきた超高エネルギー宇宙線の起源を解明することになるであろう[注3]．

ニュートリノはその固有の性質が限りなく無に近い粒子であるが，我々に素粒子物理学の多くを教えてくれただけではなく，天体物理学や宇宙論にとっても特色ある研究分野を提供するであろう．この本はあなた方を，物理学者がニュートリノの研究を通して多くのことを学んだプロセスや，その時々の苦闘について紹介する旅路へと案内する．この旅路のある部分は，ニュートリノの実験のように容易ではないだろう．しかし，私はあなた方が実験家のようにへこたれることなく，私や多くの人達がこの捕らえどころのない素粒子に対して抱いている魅力を共有して，ニュートリノに関心を持つようになることを望む．この旅路は，あなた方を原子核の心臓部へ，はるか彼方の宇宙空間へ，また，時間をさかのぼって 20 世紀の初頭まで，さらには宇宙開闢まで案内する．この旅が，あなた方にとって楽しいものであるよう….

注 2　1998 年に日本におけるスーパーカミオカンデ実験によって，大気ニュートリノ振動現象が発見され，ニュートリノが質量を持つことが初めて確認された．

注 3　その後の γ 線天文学や X 線天文学の進展により，現在，我々の銀河系内の宇宙線の起源は，超新星残骸が有力視されている．一方我々の銀河系外の宇宙線源は活動銀河核などが候補に挙っているが十分に理解されていない．



CERN（欧州共同原子核研究機関）における高エネルギーニュートリノ・ビームを用いた実験は，基本粒子や基本力に関する幾つかの重要な発見をもたらした．研究所はジュネーブの北の郊外に位置し，南の方角にモンブランが見えるこの空中写真の最前部の中央側が研究所の中心部である．（CERN 提供）

第2章

ニュートリノ仮説

パウリの創造物であるニュートリノほど，人間の成す業の中で“直感のひらめき”という言葉をうまく言い当てる例は他に見当たらない.[1]

ブルーノ・ポンテコルボ，1980.

“親愛なる放射能淑女，紳士殿...” 現代物理学の中で最も有名な手紙はこのような見出しで始まる．差出人はチューリッヒにあるスイス連邦工科大学の30才の理論物理学教授，パウリであった．差し出し日は1930年12月4日．オーストリア人の研究者，リーゼ・マイトナー女史が宛先人の中心人物の一人であった．

1907年以来，マイトナーはベルリンで放射性物質の実験的研究に従事してきた．1930年12月に，彼女はチュービンゲンの学会に集まった放射能研究の専門家達の中に同席していた．この学会はパウリが手紙の中で述べているように，12月6，7日にチューリッヒで催されるダンスパーティのために滞在を余儀なくされ，出席を辞退したものである.[2] しかし，欠席の弁解を楽しむことがこの手紙の主旨ではなかった．そうではなく，パウリは原子核物理学の中で明らかになりつつあった矛盾に対する絶望的な解決策を，同僚の研究者達と分かち合う決心をしたのである．

その解決策とは，ニュートリノとして後日知られるようになった新しい素粒子の存在を提唱することであった．当時，物理学者達は我々が現在素粒子と呼んでいる粒子に相当するものとして，わずか3種類の電子，陽子，光子

(光の粒子）を知っているのみであった．このような状況の中でのパウリの提案は，単純な素粒子描像を変更するもので，とっぴに見えたのは確かであった．しかし，パウリは絶望的な解決策を裏付けしてくれるに十分に値する原子核物理学におけるいくつかの未解決問題を真剣に検討し，その結果，“放射能”諸氏に問いかけたのであった．

さしあたり，私はこの考えについて論文にするつもりはありません．まずは親愛なる“放射能”諸氏に，どのようにしたらこのような粒子を実験的に検証できるかという問題を内々に問いかけたいのです.[3]

パウリをこのように注意深くもかつ大胆にした原子核物理学の危機とは，1920年代終わりに持ち上がった．今では我々は，いくつかの異なる問題があったことと，ニュートリノがこれらの問題の一つを解決したことを知っている．この特異な問題とは，20年以上におよぶ論争の源泉であった．それは放射能現象に関するもので，論争の渦中にいた中心人物の一人がマイトナーであった．

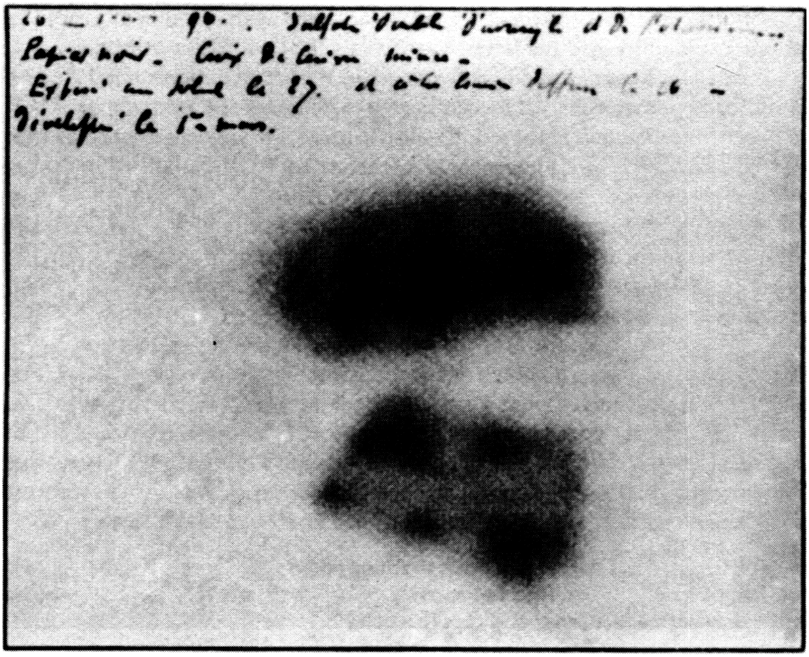
ベータ線の困難

今，私は本の改訂版にベータ線の問題を書こうとしている．そして，それがこの本の中でもっとも難しい作業であると考えている.[4]

アーネスト・ラザフォード（オットー・ハーンに宛てた手紙より），1911.

フランスの物理学者，ヘンリー・ベックレルは1896年に放射能を発見した．彼は数日間ウラン塩と一緒に引き出しの中に放置しておいた写真乾板が，ちょうど光りを受けたかのように黒ずんでいるのを見つけた．その後の調べからベックレルは，彼自身がウラニウム線と名付けたある種の放射線をウラニム塩が放出していることを確認した．

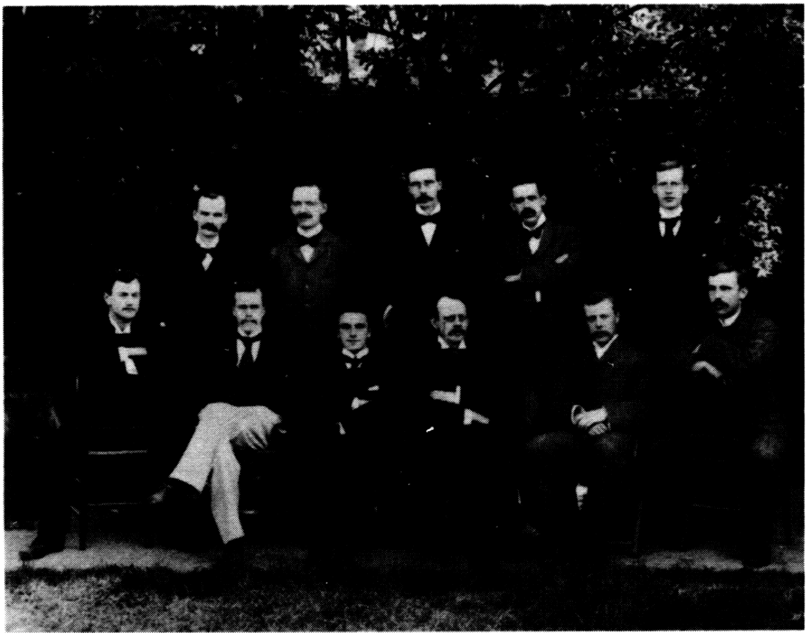
ただちに，多くの研究者達がこの新しい現象の研究に取り掛かった．その中に，奨学金を獲得してケンブリッジ大学に留学していた25才のニュージーランド人，ラザフォードがいた．1896年に彼はキャベンディッシュ研究所で，所長のジョセフ・ジョン（‘J.J.’）・トムソン教授のもとで研究を進めていた．彼らはX線がどのようにして気体をイオン化するのか，別の言い方では，



このピンボケの像は，写真乾板に映しだされたものである．1896 年 2 月にベックレルは，引き出しの中の写真乾板の上にウラニウム塩の塊を置いて保管していた．これが，ベックレルによる最初の放射能の発見であった．(AIP ニールス・ボーア図書，ウィリアム・G．マイヤー所蔵)

X 線が気体を正電荷と負電荷成分に分離する仕方について共同で研究を行っていた．ベックレルがすでに，空気中を走るウラニウム線も同様の電離効果を与えることを発見していたため，ラザフォードがただちにこの新しい放射線を用いる研究に転じたのは当然の成りゆきであった．

1897–8 年の間，ラザフォードはウラニウム線の吸収に関する系統的な研究を開始した．そして，この研究の中で彼は重要な発見を成し遂げた．それは，ウラニウム線が 2 成分あるように見えたことであった．その一つはラザフォードがアルファー線と名付けた成分で，0.002cm 程度の厚さのアルミニウム箔によって容易に吸収された．一方，2 番目の成分は数百倍もの高い透過性を示し，ラザフォードはこれをベータ線と呼んだ．(フランスの物理学者，



ラザフォードは 1895 年にケンブリッジ大学で研究するため，ニュージーランドからイギリスにやって来た．この写真は 1897 年キャベンディッシュ研究所で研究生達と一緒に撮ったもので，前列右端がラザフォードである．1897 年から 1898 年の間に行われたウラニウム線の系統的な研究によって，彼は物質中で異なる透過性を持つ 2 つの成分が存在することを発見した．そして，最も容易に物質に吸収される成分を‘α 線’，次を‘β 線’と名付けた．(ケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所)

ポール・ビラードは 1900 年に，ウラニウム線の中からもっと透過力のある放射線を発見した．この第 3 成分は当然のことながら，ガンマー線と呼ばれるようになった… $\alpha\beta\gamma$ の順)．

ラザフォードはアルファー線の正体を突き止めるために，自分自身で多くの決定的な実験を行った．それは，10 年におよぶ苦闘であった．そして，1908 年になってようやく彼は，共同研究者のハンス・ガイガーとともに次のような結論に至った：“アルファー粒子はヘリウム原子である”，あるいは，もっと正確には“アルファー粒子から正電荷が消えるとヘリウム原子になる”.[5] しかし，彼らはまだアルファー粒子をヘリウム原子核と同定する，最終決定にたどり着くことができなかった．そのすぐ後の 1910 年にラザフォードは，

ガイガーとアーネスト・マースデンが測定した結果に対して大胆な解釈を試み，原子の中心に原子核が存在するという概念を提唱した．

ベータ線の正体の解明には，いくつかの研究所の研究者達が（ラザフォードほどではないとはいえ）重要な貢献をし，より短い期間で明らかになった．例えば1900年に，れき青ウラン鉱からラジウムを精製することに関して権威であったピエール&マリー・キューリ夫妻は，ベータ線の電荷を測定して負であるという結果を得た．同じ頃にベックレルは，ベータ線の電荷と質量の比を測定した．そして，陰極線つまり電子とほぼ同じ値であることを突き止めた．そののちの1902年にゲッチンゲン大学のウォルター・カオフマンは，ベータ線が電子の流れであることをはっきりと示す決定的な実験証拠を報告した．

この当時は，ベータ線である電子が原子内のどこで作られるのかという論議はなかった．物理学者達はカオフマンや1897年のJ.J.トムソンによる実験から，原子内部に電子が存在していることを知っていた．しかし1902年の時点では，電子が中心にある硬い原子核の周りを回っているというラザフォードの原子模型は，まだ先の話であった．とはいえ，ある特定の放射性物質から出てくるベータ線が全て同じエネルギーを持つのかどうかは，疑問であった．このことはアルファー線に対しては正しかったが，ベータ線でも同じなのか？ 1907年にオットー・ハーンとマイトナーを実験に踏み切らせたのが，この疑問であった．

28才のハーンは，今はモントリオールのマクギル大学の教授であるラザフォードとともにした短期間の研究を終えて，ベルリン大学の化学教室に赴任した直後であった．ハーンよりもわずか数ヶ月年上のマイトナーは，ウィーンで物理学を学び，そこでアルファー線やベータ線の吸収に関する研究を行っていた．1907年に彼女はベルリンに移り，ハーンと出会った．そしてドイツの偏狭な民族政策によって1938年に離れ離れになるまで，30年以上も続いた放射能の共同研究を開始した．この共同研究は，幾種類もの新しい放射性物質の発見を生み，また原子炉や初期の原子爆弾の動作を支配する現象である核分裂の発見をもたらすなど，傑出した成果を挙げた．

ハーンとマイトナーが一緒に研究を始めようとした頃，化学教室主任のエミル・フィッシャーは，女性が化学教室で研究することを許可しなかった．彼

はロシア人女子学生のその特異な髪型にブンゼンバーナーの火がつかないようにと，常に心配していることをマイトナーに告げた.[6] やがて2年後の1907年に，化学教室で研究をすることが許されたとはいえ，ハーンとマイトナーは，木工作業場を改造してそこで研究を始めざるをえなかった.

二人は不純物を含まない純粋の放射性物質は，一定の速さ，つまり一定のエネルギーを持ったベータ線を放出するという仮説を検証することにした．彼らは最初の実験結果が，この仮説を裏付けているものと信じた．そして，1908年にこの結果を論文にした．しかし彼らは，電子が物質中で吸収される仕方に間違った仮定をしていたことが後に判明した．事実，彼らが次々と厚さを変えて測定したアルミニウムにおける吸収は，ベータ線が一定のエネルギーを持つことを表すものではなかった．そこで，ハーンとマイトナーは，道路を少し登った所にある物理学教室にいたオットー・フォン・バイヤーを共同研究者に加えて，別の実験手法を用いることにした.

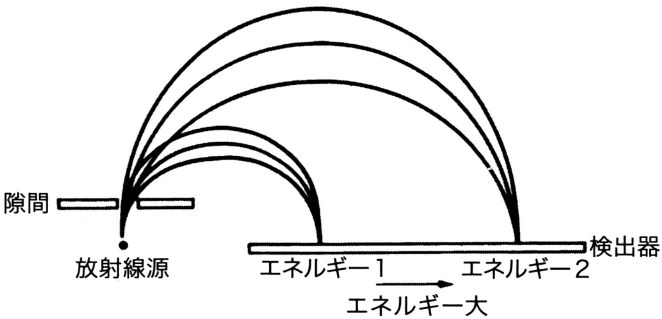
化学教室と違って物理学教室には，自由に使える磁石がいくつかあった．そしてフォン・バイヤーはこれらの一つを利用して，単純な原理のベータ線エネルギー分析器を組立てた．ベータ線である電子は負の電荷を持っているため，この装置の磁場の中を通る時に曲線軌道を描く．電子の速さ，つまりエネルギーが大きくなればなるほど，曲率はどんどん小さくなる．このように，磁場はちょうどプリズムが色によって光線を振り分けるかのように，電子線をその速さに応じて空間的に分散させる.

ハーンとマイトナーは，彼らが作った最も純度が高くかつ最も薄い試料から放出されるベータ線の速さを測定するために，フォン・バイヤーと一緒にこの分析器を使用した．試料が薄いということは，磁場に入る以前にベータ線が試料物質を抜け出る途中，そこで誘発される反応が減少することから重要であった．彼らは化学教室で試料を用意し，大急ぎでそれを物理学教室に運んだ．マイトナーは後に次のように回顧している：

ハーンと私は，できるだけ放射能の純度を保った状態で物質を沈殿させることを試みた．それは，非常に短くて細いワイヤーの上に可能な限り薄い層を作って，ベータ線を検出したいためであった．この作業がうまくと，次に我々はフォン・バイヤーの作ったベータ線エネルギー分析器でこれらの試料を測定するために，鉄砲から弾丸が放たれるかのように化学教室を飛び出して1km離れた物理学教室までの坂道を駆け上がっ



マイトナーとハーン．二人は，マイトナーがナチスによってドイツから追放されるまでの 30 年間に渡って放射能の共同研究を続けた．彼等は核分裂の発見の引き金となった仕事で最もよく知られている．しかし 1907 年に始めた彼らの初期の研究は，放射性物質からベータ線として放出される電子のエネルギー分布を調べることであった．(アルシュタイン・ビルダーディーンスト)



この簡潔な原理に基づくベータ線エネルギー分析器では，磁場は放射性物質から飛び出す電子の軌道を曲げる働きをする．これによって，電子は検出器に向かって図のような飛跡を描く．そして，最大エネルギーを持つ電子が磁場によって最も小さな偏向を受けるように，電子はそれぞれのエネルギーに応じて異なる飛跡をとる．その結果，異なったエネルギーの電子は検出器上の別々の場所に到達する．マイトナーやラザフォードによる初期の研究では，検出器に写真乾板が用いられた．(この図で磁場の方向は紙面に垂直にかけられる.)

た.[7]

この努力の結晶は，1911年に次のような結論を与えた．それは，純粋な物質から放出されるベータ線は，いろんなエネルギーを取り得るというものであった．しかし一方で，一定のエネルギーを持つという考えがまったく否定されたわけではなかった．ここでハーンとマイトナーは，電子が一定のエネルギーを持って放出されるものの，何か二次的な要因によってその速さが変更を受けるという解釈を固執した．さらに1922年までに，何人かの研究者が多くのスペクトル線，つまり，いろんなエネルギー値を持つベータ線が集まっている証拠を検出したため（18ページの図を参照），状況はより複雑になってきた．

これらの研究のほとんどは，ベータ線のエネルギー分布を測定する点に関して基本的に同じ手法に頼っていた．それは，エネルギーの大きさによってベータ線を分離するエネルギー分析器と，エネルギーに応じて異なった角度に曲げられるベータ線の強度を測る写真乾板を用いるものであった．しかし，1914年の初めにラザフォードは1通の手紙を受け取った．そこには，これま

でとは幾分異なる測定技術を用いる研究が提案されていた.

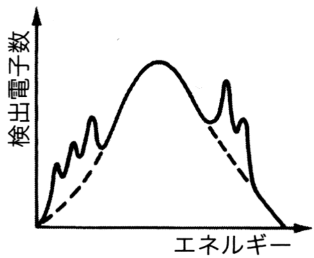
私は非常に迅速にかつ容易に写真を撮ることができます. しかし, 粒子検出器を使えば写真に現れる粒子痕跡の陰影を取り除くことができます. おそらく, 写真乾板による測定に, 何かつまらない間違いがあるのでしょう.[8]

この手紙はジェームス・チャドウィックからであった. 彼が述べている粒子検出器とは, 金属板と先の尖った針から構成されているものであった.

英国チェシャー州ボーリントン生まれのチャドウィックは, ラザフォードが 1907 年から 1919 年まで教授の職に就いていたマンチェスター大学で物理学を学んだ. ラザフォードの影響を強く受けた彼は, 1911 年に卒業した後もマンチェスターに留まり物理学の研究を続けた. そして, 1913 年に新しい場所で研究することが条件になっている奨学金を獲得した. チャドウィックがドイツ帝国物理技術院にいるガイガーと一緒に研究をするために, ベルリン行きを選んだのはもっともなことであった. というのは, ガイガーはかって数年間, マンチェスターでアルファー線の性質を調べる研究や, ラザフォードを原子核の発見へと導いた有名なアルファー粒子の散乱実験を通じて, ラザフォードと共同研究を行っていたからである.

チャドウィックはベルリンに着くと直ぐに, ベータ線のエネルギー分布の中のいくつかのスペクトル線に関与する電子を計測するために, ガイガーが考案した位置検出器を使用することにした. この検出器の動作原理は以下のとおりである. 金属板と針の間に電場が印加される. そして, ベータ線のような荷電粒子が検出器をよぎると, 荷電粒子は検出器内の空気を正電荷と負電荷の成分に分離する. その結果, 検出器を通過する粒子数によって強さが異なる放電が電場内で起こる.

チャドウィックは全エネルギー分布の一部の領域のみ測定するために, エネルギー分析器から出てくるベータ線を狭いスリットを用いて選別し, このスリットを通過するベータ線の強度を位置検出器で測定した. 次に, エネルギー分析器内の磁場の強さを変えてエネルギー分布の別の領域, つまり異なるエネルギー領域を選ぶことができた. 彼はこのような測定を徹底的に行い 1914 年 4 月までに, ベータ線のエネルギー分布は複雑な線スペクトルではなく, 基本的には広いエネルギー範囲にわたって, 緩やかに変化する連続分布



チャドウィックが発見したベータ線のエネルギー分布は，なめらかで連続的な分布と，異なるエネルギー値での数本のピーク，すなわち線状スペクトルの重ね合わせであった．これらの線状スペクトルは，ベータ線電子や放射性原子核から放出されたガンマー線などによって，原子軌道から叩き出された電子に起因する．

であると確信した．実際のエネルギー分布は，連続分布の上に数本のスペクトル線が重ね合さった分布をしていた．

どうしてこのようなことが起こるのだろうか？ ハーンやマイトナーからラザフォードにいたるまでの当世屈指の研究者達は，ベータ線がいろんな物質から出てきているため，それぞれのスペクトル線を観測しているのではないかと主張した．チャドウィックはこのような解釈に対する反論をまとめ，実験結果と併せて論文にした．他の研究者達がベータ線の測定に用いた写真感光による手法は，誤りを犯しやすい．すなわち，検出した粒子数のわずかの変動が，現像された乾板上の濃度に大きな差異を生じる可能性がある．そして，最終的に得られる像の濃さは現像時間によって異なる．このようにしてチャドウィックは，明らかにバックグランドがないにもかかわらず，濃い線が写真乾板に生じる理由を説明した．

かくして，ベータ線のエネルギー分布にまつわる論争の第1幕が終了する．第2幕は，多くの科学者が他の労働に組込まれていった第一次世界大戦直後に始まる．マイトナーはオーストリア軍のX線看護婦になった．ハーンはドイツ軍歩兵連隊に所属する予備兵となり，後に化学兵器開発プロジェクトに加わった．そして，戦争が勃発した時にベルリンでベータ線の研究に没頭していたチャドウィックは，ルーレベンに拘留された．そこは，シュパンダウ（ドイツ北東部の都市，後にベルリンに併合）の近くにある競馬場の馬小屋を

本拠地とする収容所であった.

結末

…ベータ線の連続エネルギー分布の原因について，長い時間を費やした論争は決着しそうだ.[9]

チャールス・エリス，ウィリアム・ウースター，1927

ルーレベンの収容所に科学者組織が形成され，ここで，チャドウィックはチャールス・ドルーモンド・エリスに出会った．彼はウーリッジ（ロンドン東部の自治区）にある王立陸軍士官学校の士官候補生であったが，1914 年の夏に休暇でドイツに来ていた．そして，戦争が始まった時もまだ滞在していた．ルーレベンでの体験は，エリスを将来が約束された職業軍人の道から物理学者に進路を転換させるものであった．そして終戦後，彼はすぐにケンブリッヂにあるトリニティ大学に入学した．彼は 1920 年代のベータ線の論争に決着をつける重要な役割を演じることになった.

戦争が終わって物理学者達が本来の研究に戻ってきた時には，ベータ線の研究は発見が相次ぐ新しい研究分野，原子核物理学の一部となっていた．1911 年にラザフォードは，原子の中心に正電荷を持つ小さくて重い原子核が存在することを立証した．そして 1913 年にデンマークの理論物理学者，ニールス・ボーアは，ラザフォードの発見を根拠の一つとして，最初の原子に関する量子論を発表した.

ボーア理論によれば原子内の電子は，ある特定のエネルギーのみを持つことができる．すなわち，電子のエネルギーは量子化されている．このことは，中心にある原子核の周りを回転する軌道の中で，許される軌道に対応するエネルギーのみを取り得ることを意味する．ボーアはすぐに，ベータ線電子は原子核の回りを廻っている電子ではないことを示した．それは，単にベータ線のエネルギーが大きすぎるという理由からである．それなら，もっともらしい代替案は，ベータ線電子が原子核内を起源とすることであった．このことは，原子核内に電子が存在することを意味する.

その後数年間，ラザフォードは原子核の研究を続け，少なくとも原子核の

内部には電子と符号が反対で，等量の正電荷を持つ粒子が存在しなければならないことを突き止めた．ラザフォードが陽子と名付けたこの粒子は，水素原子の原子核として単独で存在し，他の元素の原子核内では多数まとまってグループを作っている．

しかしながら，原子核を陽子だけから作ることは不可能であった．どんな原子でも，原子核内の全正電荷は原子全体で電気的に中性にするために，電子の全負電荷と釣り合わなければならない．しかし，電子数と同数の陽子だけを含む原子核は，その重さが実測値のほぼ半分に相当し軽すぎることが明らかになった．この測定結果は，原子核が陽子と電子を含んでいなければならないという結論を与える．この電子は原子核の質量を補うために新たに付加される陽子の正電荷を相殺する負電荷の担い手である．いずれにせよ，ベータ放射において電子が原子核から出てくるのであるから，問題は，よりもっともらしい原子核模型とは何か？である．

電子と陽子から構成される原子核模型は，1920年代初めまでに確固たるものとなった．哲学者のバートランド・ラッセルは，1923年に出版した一般向け科学書“原子のABC”の中で次のように述べている：“原子核について知られている全てのことは，原子核が水素原子核の陽子と電子から構成されているという仮説と矛盾しない”.[10] このような状況下のもとで，ベータ線のエネルギー分布の問題が再浮上した．

当時，ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所長であったラザフォードから強い影響を受けたエリスは，一連の重要な実験に取り組んだ．彼はガンマー線の照射を受けた物質から，電子が生成される仕組みを研究していた．(ガンマー線はエネルギーの高い光のことで，放射性物質から放出される第三番目の成分である)．この研究の中でエリスは，ベータ線のエネルギー分布に現れる何本かのスペクトル線が，“同じ原子”の原子核から発生したガンマー線によって，原子の内部軌道からたたき出された電子によるものであるという重要な結論に辿り着いた．この反応過程は，現在“内部転換”として知られているものであり，連続エネルギー分布の上に重なるスペクトル線の存在を説明する．

エリスはこれらの結果を1921年に発表した．この時，ベルリンのダーレムにあるウィルヘルム皇帝化学研究所で研究していたマイトナーは，このあと

一斉反論を仕掛けた．彼女は依然として，全てのベータ線が同じエネルギーを持って原子核から出てくるという仮定に基づき，ベータ線のエネルギー分布に対して複雑な解釈を提案した．しかも，彼女はチャドウィックが発見したエネルギー分布の連続成分をまったく無視した．この事は明らかにマイトナーがチャドウィックの実験方法では，個々のスペクトル線の分離が不可能であると思い込んでいたことによるものであった．エリスはただちに，マイトナーの仮説の拠り所であった彼女の測定結果を再現する実験を行ったところ，異なった結果が得られた．“マイトナーの解釈は検証できなかった”これがエリスの結論であった．

論争は激しさを増した．そして，1925 年にエリスとウィリアム・ウースターは，局面を打開しようと実験を開始した．彼らの目的は，単一のベータ崩壊に伴う全エネルギーを測定することであった．もし，ベータ線電子が一定のエネルギーを持って飛び出し，そしてマイトナーが提案したように電子が試料物質中での反応によって他の粒子にこのエネルギーの一部を分け与えるなら，関与するすべての粒子のエネルギー総和は，常に最初のベータ線のエネルギーと等しくなるはずである．また，その量はおそらく測定されている連続エネルギー分布の最大値に対応するであろう．一方，もし，崩壊のたびにベータ線電子がいろんなエネルギーを持って出てくるなら，エリスとウースターは連続エネルギー分布の平均値を測定するであろう．

彼らの工夫はこの実験に適した熱量計測器，すなわちベータ崩壊に伴う全エネルギーを吸収し，それによって上昇した温度を測定する容器の製作に注がれた．彼らは長さ 13mm，外径 3.5mm の鉛棒に，直径 1mm より少し大きな穴をあけた筒状の容器を使った．放射線源には，電気分解によって白金線に薄く塗られたラジウム－E（現在では，ビスマス 210 として知られている）を用い，それを鉛の容器の内側にちょうどぴったりと入る真鍮チューブの中に置いた．この真鍮チューブは，ラジウム－E の娘核であるポロニウムから放出される α －粒子を吸収する役目を果たす．

ベータ崩壊に伴う温度上昇がわずか 1/1000 °C 程度であったため，実験は慎重を要した．しかし，実験結果は決定的であった．エリスとウースターの測定結果は，崩壊あたりのエネルギーが 0.35 MeV（MeV：百万電子ボルト）となった．この値は，崩壊源であるラジウム－E から放出されるベータ線エ



1933年10月にブリュッセルで開かれた第7回ソルベイ会議の参加者の中に，ベータ放射のエネルギー分布の研究にかかわる重要人物達がいた．ベータ放射を発見したラザフォード，線状のスペクトルを観測したマイトナー，これに対して，連続的に変化するスペクトルを観測したチャドウィック，最終的にエネルギー分布の連続性を検証したエリス．しかし，なぜ連続的であるかを理解するにはパウリの洞察力を必要とした．(ソルベイ国際物理学会，AIP ニールス・ボーア図書の好意による)

ネルギー分布の平均値に近く，そして，エネルギー分布の最大値である約 1 MeV よりは十分小さかった．

（電子ボルト（eV）とは，原子物理学や原子核物理学においてエネルギーを表すために使用される基本的な単位である．1eV は，電子が 1 ボルトの電位差の電極板の間を通り抜ける時に受け取るエネルギーである．日常生活と関わる巨視的スケールにおいては，これは想像できないほど小さなエネルギー量であるが，原子のスケールでは適切な単位である．しかしながら，原子核反応に伴うような高いエネルギーは，より大きな単位である百万電子ボルト（MeV）によって表わす方がもっと便利である．）

マイトナーにとっては大きな衝撃であった．彼女はこの結果を聞いた後に，ウィルヘルム・オルトマンとともに同様の実験を繰り返す準備にとりかかった．エリスとウースターが実験結果を発表してから 2 年後の 1929 年 12 月に，マイトナーとオルトマンは彼らの結果を確認した．ベータ線のエネルギー分布は，まさしく連続的であった．

エネルギー危機

このところ私は，保存則の適用限界について真剣に考えてきた…そして，…ベータ崩壊の逆過程において，我々は不可解なエネルギー源，…星のような…を見つけるかもしれない．[11]

ニールス・ボーア（ラルフ・ファウラーに宛てた手紙より），1929

マイトナーやハーンおよび他の研究者達が，ベータ線が一定のエネルギーを持って放出されるという解釈を，単に固執し続けたような印象を抱くことは間違いであろう．逆に彼らは自然がより単純であり，それを理解するために必要な理論は煩雑ではないという，多くの物理学者が持っている基本的な発想を堅持したと言えよう．また，彼らは科学の研究においてよく使われる手法である，“他からの類推”を指導原理にしていた．

アルファー線の実験結果は，全て同一のエネルギーを持って放出されることを示していた．またそうでなくても，それぞれの実験グループは互いにほぼ確定したエネルギー値を検出した．さらに，ボーアの原子量子論は自然が

連続的に振舞うという概念を放棄しさえすれば，原子内で起こる現象を理解する方法を教えてくれた．ボーア理論の成功は，原子内の反応過程が飛び飛びに起こり，各過程つまりひと飛びは特定のエネルギー変化を伴うという直感に反する仮定を導入したことによるものであった．そのためベータ線放射のように，連続性を示しているかに見える原子核の反応過程に直面したことは驚きであった．

ベータ線が連続エネルギー分布を持つことで，さらに深刻な問題があった．それは，物理学上の黄金律であるエネルギー保存則を破るかのように見えた．この保存則は多くの実験事実に基づくもので，系の全エネルギーは外部の系から何らかの作用がない限り，変化せずに一定に保たれなければならないことを保証するものである．

1920年代後半になって明らかになったベータ線の放射現象に対して，この保存則はどのような意味を持つのだろうか？ 順を追って話しを進めよう．ベータ崩壊において，原子核は電子を放出する．この過程によって原子核は負電荷を一つ失い，別の種類の原子核に転換する．そして元の原子核はエネルギーを失う．ベータ崩壊前の全エネルギーは，元の原子核の静止質量に等しい．（アインシュタインは1905年に発表した特殊相対性理論の中で，質量とエネルギーが等価であることを示した）．しかし，崩壊によって新しくできた原子核は常に元の原子核よりも軽い．その差は，放出された電子の質量エネルギーだけでまかなわれる量よりずっと大きい．原子核が失った質量エネルギーが，電子の運動エネルギーに転化したと考えるのが自然である．

解放されるエネルギー量は，原子核の種類が決まるとその崩壊において，常に同じ崩壊粒子を生成するので同じくなるべきである．このことは，電子が常に特定のエネルギーを持って放出されることを意味する．このことは，チャドウィックやエリス，ウースターの実験結果とまったく相反する現象である．

これが，ベータ崩壊に宿る問題で，この問題を深刻に受け止めた一人がボーアであった．おそらく1928年の後半頃からボーアが考えるようになった解決策とは，原子核の中ではエネルギー保存則を放棄せねばならないという革命的なものであった．

1930年5月8日，ボーアはロンドンのソルター講堂で化学学会の研究者達に，ファラデー講演を行った．そこで彼は原子核物理学に関わる現在の問題

点について，自分の考えを披露した．そして，盛り沢山の講演内容に中で特にベータ崩壊の問題を詳しく解説した．しかし，この講演内容は1932年に化学会誌に掲載されるまで公表されなかった．ここでボーアは次のように主張している：

現在の原子描像において，ベータ崩壊に対してエネルギー保存則を堅持することは，実験的にも理論的にも疑う余地はない．しかし，そうしようとすると理解しがたい困難な状況に陥る．[12]

それでもやはりボーアはこの問題の深刻さを実感し，付け加えている：

もちろん，大胆にもエネルギー保存則を放棄すれば，それはおかしな帰結をもたらすであろう．[13]

ボーアはすでに物理学の常識であった法則に真っ向から挑んでいた．彼の原子量子論は，現実離れした新しい原理に基づいていたため，彼は奇抜なアイディアに不慣れではなかった．ファラデー講演の後半で，彼は次の点を強調した：

さらに，物質の一般的な物理的および化学的性質を説明するために必要な原子構造の諸概念を理解しようとすると，まさに因果律の古典的な考え方を放棄することに行き着くように，よりいっそう深遠な概念である原子の安定性は，エネルギーの釣り合い（保存）という黄金律の断念を我々に強要するかもしれない．[14]

先入観なしで言えることは，ベータ線の連続エネルギー分布の問題は，原子核研究の発展を阻止する唯一の困難であった．そして，ボーアの極端な提案は，このような厄介な謎解きを考え抜いたあげくの結果であった．

当時の物理学者が信じていたような原子核の内部に電子が存在する模型は，直ぐにつじつまが合わなくなってしまう．ボーアはさらにファラデー講演の中で説明している：

…現在の量子力学の枠組みでは，“なぜ4個の陽子と2個の電子が一緒になって，安定なヘリウム原子核を形成するのか？”，この理由を説明することはほとんど不可能である．アルファー線の散乱実験から求まるヘリウム原子核の大きさは電子の古典半径と同程度であるために，点状電子の仮定に基づくあらゆる理論が適用できないことは明らかである．[15]

言い換えれば，実験から決められた大きさを持つ原子核の内部に電子を押し込めることは，量子論を適用する限り不可能であった．

原子核に関する3番目の問題は，スピンの特性に関わるものであった．スピンとは電子や陽子が持っている固有の角運動量のことである．二人の若いオランダ人，ジョージ・ウーレンベックとサミュエル・ゴートシュミットは，1925年に電子がスピンを保有していることを発見した．ボーアの原子論は，原子内部の電子の軌道角運動量を量子化した．つまり角運動量は整数量子数：0，1，2，3，…の値を持ち，その中の特定の値のみをとることが許される．ゴートシュミットとウーレンベックは電子に1/2の量子数を追加すると，原子のエネルギー・スペクトル中の微細構造が説明できることに気付いた．このことは電子に余分の角運動量を与えなければならないことを意味する．そして二人の研究者はこの角運動量を，時計回り：(＋1/2)，反時計回り：(－1/2) に対応する2つの量子数を持つスピン（自転）に例えた．2年後に，ミシガン大学のデビッド・デニソンは，陽子も電子と同じスピン，つまり1/2を保有していることを提唱した．

陽子と電子を構成要素とする原子核模型の問題点は，原子核内の陽子や電子にスピン量子数を付け加えることから持ち上がった．特に，パサデナのカリフォルニア工科大学で研究をしていた若いイタリア人，フランコ・ラセッティは，1929年に窒素原子核が全スピン＝1を持っているかのように振る舞うことを突き止めた．しかし，原子核の（陽子＋電子）模型では，窒素原子核は14個の陽子と7個の電子，つまり1/2スピンを持つ21個の構成粒子を含んでいるはずである．そのため，これらのスピンの全数が，全角運動量を形成するように結合していないように見える．それはまるで電子が原子核の内部に入ると，個性を失ってしまうようであり，ボーアはこの点に関して，原子核内電子の“驚くべき消極性”と呼んだ．[16]

絶望的な救済策

1931年6月，パサデナでの会議の席で私は次のような解釈を提案した：保存則には正当な根拠がある．一方，ベータ線がこれまでに検出されないような高い物質透過性を持つ中性粒子を伴って放出されるとしたら，これを排除できるか！[17]

ヴォルフガング・パウリ，（第7回ソルベイ会議より），1933

1929年7月1日，ボーアはチューリッヒ連邦工科大学にいる親友であり，また研究仲間であったパウリに手紙を送った．彼は思案中であったいくつかの問題点をまとめた2通のメモを同封した．その中の1通が，論文にすることをためらっていたベータ線スペクトルに関する短い私見であった.[18] 彼はパウリに意見を求めた．“厳しい返事は覚悟で…”

パウリは7月17日に，彼特有の無遠慮な調子の返事を書いた：

あなたのベータ線に関する解釈は，私をまったく満足させてくれないと言わざるをえません．…チューリッヒでマイトナー女史は我々に見事な講演を行いました．…そして彼女は私に，ベータ線の連続エネルギー分布がガンマー線の放出などの二次的な過程で説明できないことを十分に確信させてくれました．しかし，そこでは一体何が起っているのか，我々は全く判りません．あなたもそうであるように．…とにかく，しばらくの間このメモの中味については，そっとしておきましょう．そして，星をいつまでも平穏に輝かせておきましょう（23ページのボーアの手紙の文章参照）.[19]

この手紙でパウリは，ベータ線スペクトル問題に対するボーアの解決策に嫌悪感を表わしたが，代案を示さなかった．しかしながら，種はすでにまかれていた．パウリはベータ線に対する彼自身の考えを12月までにまとめた．しかし，このことを論文にすることを望まなかったとはいえ，チュービンゲンに集まったマイトナーらの物理学者に宛てた有名な手紙の中で披露することになった．現在，ニュートリノとして知られている粒子についての最初の記述である．

パウリは，彼の新粒子をドイツ語の“neutronen（中性粒子）”と同じ意味の“ニュートロン”と命名した．手紙の中で彼は次のように述べている：

…原子核の内部には，電気的に中性の粒子が存在するであろう．私は，スピン = 1/2を持ち，排他原理を満たし，光速で動くことができない点で光子と異なるこの粒子を，“ニュートロン”と呼ぶことにする．“ニュートロン”の質量は，電子の質量と同程度であるべきで，いずれにせよ陽子の質量の1/100以上ではないだろう．連続ベータ線スペクトラムは，ベータ崩壊において“ニュートロン”と電子のエネルギー総和が常に一定となるように“ニュートロン”が電子と一緒に放出されると仮定すれば，理解できるであろう.[20]

手紙は“ニュートロン”の導入が，ベータ崩壊のエネルギー分布に及ぼす効果を指摘している．この筋書きによると，崩壊の際に開放されるエネルギー



ボーア（右）は，ベータ放射の連続エネルギー分布を説明するために，量子レベルでのエネルギー保存則の放棄を唱えた．しかし，パウリ（左）はそのような根本を揺るがす変更は正しいはずがないと反論した．(ニールス・ボーア研究所保管)

は，電子と反跳原子核と“ニュートロン”の3粒子に分配されなければならない．このことは，電子と“ニュートロン”の合成運動量が反跳原子核の運動量と釣り合ってさえいれば，またパウリの言葉を借りるなら“ニュートロン”と電子のエネルギー和が一定であれば，いろんな分配の仕方が可能である．極端な例は電子が全運動エネルギーを持ち出し，“ニュートロン”が静止する場合である．これは，測定されるベータ線エネルギー分布の上限値に対応する．逆の極端な例は電子が運動量を持たず，“ニュートロン”が全てを持ち出す場合である．

パウリはこの解決策がベータ線の連続エネルギー・スペクトル問題だけでなく，原子核のスピンに関する問題も同時に解決しそうであることから注目はしていたけれども，それを絶望的な方法と思っていた．パウリは，原子核の内部に電子が存在するという概念を捨て切れず，電子や陽子と同じくスピン1/2を持つ“ニュートロン”も原子核内に含まれていると考えていた．この描像によれば，例えば窒素原子核は14個の陽子と7個の電子，7個の“ニュートロン”の計28個のスピン1/2の粒子から構成されることになり，これらの粒子は全体で，測定値であるスピン1を作るように結合している．(この場合，26個のスピンは互いに打消し合い，残りの2個が足し合わされる)

原子核の内部に存在し，その質量への寄与を最小限に押さえるには，パウリの“ニュートロン”は電子の質量と同程度でなければならなかった．しかし，このような粒子がこれまで検出されなかったとは，とうてい考えられない．そこで，パウリは，“ニュートロン”が少なくとも放射線の中でもっとも高物質透過力を持つガンマー線と同程度の透過力でなければならないと仮定した．そして，“これまで観測の手からのがれてきた粒子の存在をいかにして検証するか？”という興味をそそる問題を提起した．

パウリは慎重であった．彼が最初に考えを正式に公表したのは，1931年7月16日にアメリカ物理学会とアメリカ科学振興会が主催したパサデナでの会議であった．しかし彼は，会議の内容がニューヨーク・タイムズ紙に掲載されたとはいえ，講演を記事にすることに十分な自信が持てなかった．パウリの“ニュートロン”は解決策というより，むしろ一つの可能性として受け止められた．ニュートリノの導入が真の解決策になるためには，新粒子の発見といくつかの基本的な新しい理論を組合わせることが必要であった．しか

し，次の2年間で全てが出揃った．

原子核の再構築

中性粒子“neutronen”はもちろん基本粒子であることには違いない．しかし，この描像は現時点ではあまり推奨できない．[21]

ジェームス・チャドウィック，1932

ケンブリッジのキャベンディシュ研究所においてチャドウィックが新しい中性粒子の存在を実証した1932年の初めから，原子核描像は変わりはじめた．しかしながら，この中性粒子は陽子の質量とほぼ等しく非常に重かったため，パウリの仮想粒子“ニュートロン”ではなかった．

ラザフォードは1920年に，原子核の内部に電気的に中性の粒子が存在すべきであることを提案していた．そして，チャドウィックはラザフォードと共にした数年間に，何回となくこのような粒子の探索を試みてきたが成功しなかった．彼に最終的な勝利をもたらした挑戦は，1932年の初めに発表されたパリのイレーヌ－&フレデェリック・ジュリオ－キューリ夫妻による実験結果を読んだ後に始まった．ベルリンのヴァルター・ボーテとヘルベルト・ベッカー，そして，キャベンディッシュ研究所のウェブスターは以前に，ポロニウムから放射されるアルファー粒子をベリリウムにあてると，物質を透過する力の強い放射線が生成されることを突き止めた．ジュリオ－キューリ夫妻は，この放射線が水素原子核から陽子を容易にたたき出し，高いエネルギーを分け与えることを発見した．

これらの結果を読んだチャドウィックはすぐに，新しい放射線が炭素や窒素などの物質から，同じように比較的高いエネルギーを持つ原子をもたたき出せることを検証する研究にとりかかった．そしてジュリオ－キューリ夫妻も推測していたように，彼はもしこの放射線が高エネルギーのガンマー線であるなら，このように大きなエネルギーの移行は不可能であろうと主張した．さらに2月27日付けの“ネイチャー”誌に発表した論文の中で，“もし放射線が質量1，電荷0の中性粒子であるならば困難は解消する”と述べている．[22] チャドウィックは陽子と同じ質量を質量1と表した．それゆえ，この粒

子は明らかにパウリの中性粒子“ニュートロン”ではなかった.

パウリと同様に，チャドウィックは新粒子を世に送り出すことに慎重であった. 彼は論文の題名に“中性子の存在の可能性”と名付けた. このような主張を裏付けるかのように，チャドウィックは仮にエネルギー保存と運動量保存をある時点で放棄するなら，この放射線はガンマー線でもかまわないと指摘し，エネルギー非保存という亡霊を持ち出した.[23]

これらの一連の結果は，パウリの仮説とどう関わるのであろうか？ 1932年の間に物理学者は，次第に原子核模型の再検討に着手し始めた. その結果，中性子（つまり，チャドウィックの言う粒子であり，今日我々が“neutron”と呼んでいる粒子）が構成要素に加えられ，徐々に電子が追い出されることになった. さらに原子核に関する全ての困難を解くには，1つ以上の解決策が必要であることが明らかになってきた.

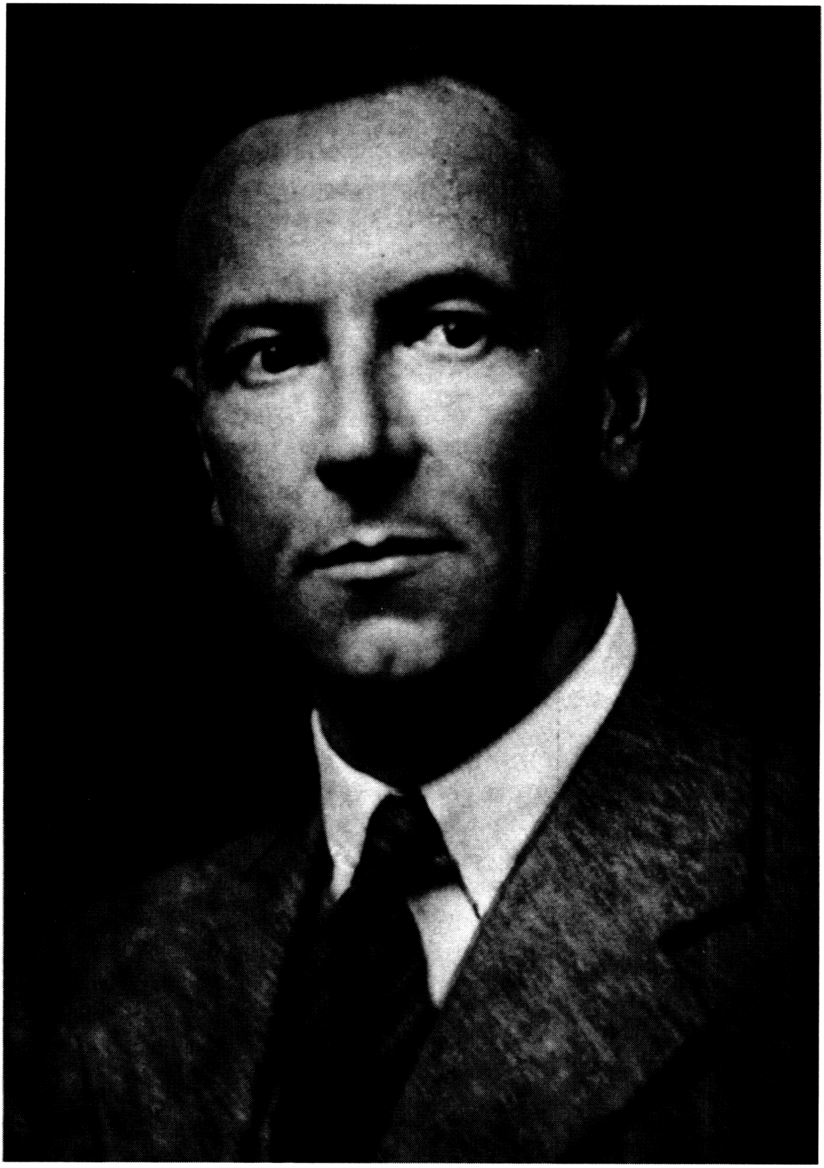
8月のフランス科学アカデミーに発表された論文の中で，レニングラード物理工科大学のドミトリ・イワネンコは，チャドウィックが渋っていた点に一考を講じ次のように述べた：

“我々は中性子が電子と陽子から構成されているのではなく素粒子と考える. … すなわち，中性子をスピン 1/2 の粒子として扱わざるをえない. ”[24]

イワネンコは，電子と陽子から構成される古い原子核模型の中の陽子7個をスピン 1/2 の中性子で置き換えることによって，窒素原子核から電子を完全に取り除いた. この新しい模型では，窒素原子核は7個の陽子と7個の中性子から構成されることになり，その結果，全体で偶数個の粒子数とスピン1を持つ原子核像が与えられた. かくして中性子の導入は，それだけで原子核のスピン問題を解決し，さらにヴェルナー・ハイゼンベルグをして，原子核内部に働く力の解明へと駆り立てた.

ドイツ人のハイゼンベルグはボーアやパウリらの親しい友人であり，かつ研究仲間であった. 彼がまだ24才の時の1925年に，ボーアの量子力学的原子論の根底にある数学構造，すなわち量子力学の基礎を構築することに貢献した. そして7年後の1932年には，量子力学を原子核へ適用することを試みた.

原子核を扱うために，ハイゼンベルグはある妥協案を設定した. 彼が描い



チャドウィック．1932年の中性子の発見は，パウリが導入した新粒子，ニュートリノを徐々に受け入れる舞台を築いた．20年前に彼は，ベータ放射のエネルギー分布が連続的であることを示した．(Godfrey Argent)

た原子核は陽子と中性子とから成り立っていたが，中性子それ自身は陽子と電子からできている複合粒子であった．ハイゼンベルグはこの最後の所で間違いを犯していたとはいえ，原子核を結合させる交換力による相互作用の概念を考案した．彼は陽子と中性子の間に働く力について考え巡らすうちに，2個の陽子が電子を交換することによって互いに束縛されると想像した．つまり電子は最初に一方の陽子と一緒にいて，中性子を作っている．そのあと，交換力によって他の陽子に移る．この状況は，水素分子イオン（H_2^+）中の2個の原子核（それぞれ単独の陽子）が電子1個を共有していることに類似している，と彼は主張した．

ハイゼンベルグの描像には不備な点が含まれていた．それは我々が今日，中性子は陽子と電子とが強く結合した粒子でないことを知っているためである．しかし，いくつかの概念は極めて重要であることが明らかになった．彼の原子核における交換相互作用の概念は，現在の核力理論の基礎となっている．そして陽子と中性子が同じく原子核を構成する粒子でありながら，幾分異なる側面を持っているという基本的な考えは，我々が素粒子を理解する上で不可欠のものとなった．

粒子生成の概念

我々はついに，輻射についての完全な理論を得ることが出来た．アインシュタインの輻射理論の全貌は，量子力学からの帰結であった．[25]

ポール・ディラック，1980

ハイゼンベルグは，中性子を陽子と電子の複合体として考えることに全く不都合を感じていなかった．ベータ崩壊現象は，電子を原子核から追い出すと理解し難くなる．もし，電子が原子核の内部にあらかじめ存在していなかったら，他にどんな方法によって電子がベータ崩壊の際に放出されるのであろうか？

イワネンコはこのからくりを理解しているものと確信していた．原子核から電子を除外した1932年8月に発表した論文の中で彼は，“ベータ線電子の排除は，新しい粒子の生成を意味するものである…”と付け加えた．[26] 今日



ハイゼンベルグ（左），ボーアとともに．1920年代にハイゼンベルグは原子の量子的性質を記述するボーア理論を，数学的基礎に基づいた量子力学理論に発展させた．彼は後の1932年頃から，原子核を束縛する力の性質の考察に研究を転じた．(AIP ニールス・ボーア図書，ワイスコッフ所蔵，エーレンフェスト・ジュニアー撮影)

のように加速器で粒子を作り出すことが日常茶飯事の時代では，このコメントはそうたいしたことでないように聞こえるが，1932年当時は，量子論の最先端の概念を反映するものであった．そもそも，粒子はどのように生成されるのであろうか？

幸いなことに1920年代の理論物理学者は，すでに容易にかつ多量に生成できる粒子，すなわち我々が光子と呼んでいる粒子をすでに取り扱うことができた．光の‘粒子’または‘量子’の概念は，アインシュタインが1905年にエネルギーの塊としての光，つまり光量子の考えを導入して以来，次第に浸透してきた．その後数年の間に，物理学者はこれらの量子がさらに運動量を持つことを実感し始めた．この光の弾丸性つまり粒子性は，1920年代の初めにシカゴ大学のアーサー・コンプトンによって最終的に実験で検証された．すぐ後の1926年には，カリフォルニア大学バークレイ校の著名な化学者，ギルバート・ルイスはこの粒子に名前をつける必要があると考え，1926

年のネーチャー誌上で光子（フォトン）という名前を提案した.

物質が電磁輻射を放出する時はいつでも，それが熱（目に見えない赤外線光子）であれ，光（可視光子）やよりエネルギーの高いX-線やガンマー線であれ，光子が生成される．それと逆に物質が電磁輻射を吸収する時，光子は消滅する．これらの作用過程を記述する理論は量子電磁力学と呼ばれている．この理論は1920年代中頃に，とりわけ一人の研究者，ポール・ディラックの研究によって誕生した.

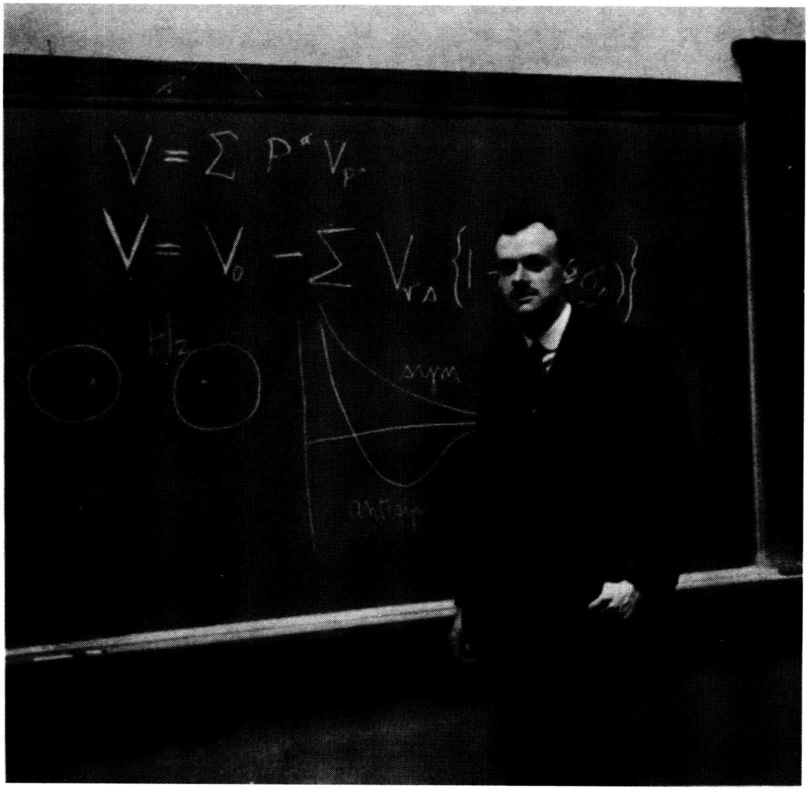
ディラックはまれに見る優秀な数学者であり，ケンブリッジ大学の研究生であった1924年に量子論に興味を持つようになった．直ちに彼の仕事は量子論の創始者達の注目を集めるようになり，1926年にコペンハーゲンのニールス・ボーア研究所に研究の場を移した．彼はそこで量子電磁力学の創設と評された論文を書いた.

この論文の中でディラックが成し遂げた偉大な貢献とは，原子と電磁輻射との間の相互作用に量子力学を適用し，そして，どのようにして原子が輻射を放出または吸収するのか，という問題を明らかにしたことであった．彼の研究の中の一つの重要な展開は，ハイゼンベルグと彼の二人の共同研究者，マックス・ボルンとパスカル・ヨルダンによって提起された説を確かめることであった．量子論ではどんな振動系にも，それぞれの量子状態に付随する一連のエネルギー状態が存在する．ボルンとハイゼンベルグ，ヨルダンは，それぞれのエネルギー状態が特定の数の‘量子’または‘エネルギーの塊り’という表現を用いて解釈できることを提案した．ここで問題になる数とは量子数に関係したものである．これが2回量子化をしたわけでもないのに第二量子化という，紛らわしい呼び名で知られた手法である.

ディラックは電磁輻射を振動系として扱った．そして，第二量子化を適用することにした．彼は電磁輻射場に伴う多くの量子状態を，関連する量子の数，つまり光子数の言葉で解釈した．ここでは，一つの状態から他の状態への遷移は光子数の変化を意味する.

ディラックはのちに次のように回想している：

> かくして我々は，光の波動論と粒子論の完全な融合を手にした．光は振動子のように扱われる波からなる電磁波の系として，またある場合，電磁場の振動子の一つに対応する光子状態からなる光子の系として扱うことができる.[27]



ディラック．彼の光子の吸収・放出に関する理論は，フェルミにベータ崩壊における
ニュートリノの放出を記述する処方箋を提供した．(AIP ニールス・ボーア図書)

ディラック理論では，原子と電磁輻射の相互作用は原子と光子群との相互作用に置き換わる．そして，原子のエネルギー変化は光子の放出（生成）または吸収（消滅）として観測されるであろう．このことは電磁場のみならず，物質の振る舞いを支配する基本的な場にも適用される一般的な手法，つまり場の量子論の始まりであった．それはまた，ニュートリノに存在理由を与えた理論として価値を認めるなら，我々が出会う最後の新しい概念である．

ニュートリノの導入

我々一同はもちろん，フェルミの新しい論文には大いに関心を持っている．…とはいえ，私はいまだにニュートリノの物理的実在について，十分な確心が持てないことを白状しなければならない．[28]

ニールス・ボーア（フェリックス・ブロッホに宛てた手紙より），1934

1926年11月，ディラックが生成・消滅の理論を研究していた頃，ローマ大学の評議会は，理論物理学部門の新しい教授の地位につくべき人材を審議していた．特に，一人の候補はずば抜けた才能を持っていた．その人物とは，フィレンツェ大学の教授で26才のエンリコ・フェルミであった．評議会の物理学者達は，全く選択に迷うことなく満場一致でフェルミが新しい地位に着くことを採択した．

そのためフェルミは出身地のローマに戻ることになり，若い物理学者達を集めて小規模ながら才気あふれるグループ作りにとりかかった．しかし，12年後にムッソリーニの政策によって，フェルミとユダヤ系の妻ローラはやむなくローマを離れ，アメリカに渡ってそこに定住した．そして，フェルミは代表的仕事となった，最初の人工核分裂連鎖反応の実現に成功した．

フェルミがまだローマにいた1933年に提案した理論は，広く知れ渡らなかったとはいえ，間違いなく重要なものであった．この理論は，原子核が陽子－中性子の結合系からなる描像をより強固なものにし，ベータ崩壊のこれまでの問題に終止符を打つものであった．すなわち，この理論は陽子や電子だけでなく，中性子やパウリ粒子（ニュートリノ）をも取り扱い，また量子力学に加えて，ハイゼンベルグの陽子と中性子の結合やディラックの粒子生成・消滅の概念も含んでいた．

1931年10月，ローマでの原子核物理学国際会議の場で，フェルミは初めてパウリの中性粒子仮説を大々的に取り上げた．フェルミはこの新しい理論に関してパウリに会議で講演するよう強く依頼したにもかかわらず，パウリはまだ懐疑的でフェルミと個人的に議論するにとどまった．フェルミが‘小さな中性粒子’に対して‘ニュートリノ’という名前を付けたのはこの時であった．この名前は会議に出席していた物理学者の間ですぐに馴染み深いものになり，その後，他の研究者の間にも広まった．

それからまもなく，中性子の発見が飛び込んできた．ローマにいた天才的でかつカリスマ性を兼ね備えたフェルミの研究仲間エトーレ・マヨラナは，ジュリオ・キューリ夫妻の結果を聞いて，ただちに彼らが中性陽子つまり中性子を発見したのだろうと推測した．そして，原子核が電子を含まず，陽子と中性子のみによって構成される理論の構築に取り掛かった．しかし，マヨラナはこの理論を公表することや，またフェルミがさらに理論を展開させることを拒否した．すぐにイワネンコらが同様の理論を作った．しかしながら，フェルミの頭の中には種がまかれていた．

翌年の1933年10月にブリュッセルで開かれた第7回ソルベイ会議のすぐ後で，この種は実を結んだ．この会議には，ボーア，チャドウィック，エリス，マイトナー，パウリなどベータ崩壊の武勇伝に名を連ねた人達や，ディラックやハイゼンベルグのような量子力学の若き指導者達など，原子核物理学研究の大御所達が出席していた．これらの人達はフェルミのベータ崩壊理論に，重要な手掛かりを提供してくれたが，それらを融合することはフェルミの天賦の才を必要とした．

イワネンコは1932年に，ベータ崩壊と光子の放射との間の類推に着目した．そして“ベータ線電子は反応過程の中で生まれ，その逆過程は光子の吸収と全く同様であり，そこでは電子の潜在性は失われる”と言った.[29] ソルベイ会議に出席していたフランシス・ペリンも同じ考えを持っていた．12月にフランス科学アカデミーに発表された論文の中で次のように述べている：

もし，ニュートリノの固有の質量がゼロならば，原子核の中にあらかじめ存在することができず，光子がそうであるように，ニュートリノは放出時に生成されるものと考えなければならない.[30]

フェルミは基本的に同じ考えであった，彼の頭の中でその考えは，理路整然とした予言力に富む理論に仕上がって行った．ペリンと同様，フェルミも12月に論文を書いた．彼はまず英国の学術雑誌‘ネーチャー’に投稿したが，編集委員はあまりにも現実味がないとして論文の掲載を断った．代わりに短い記事を，イタリアの学術雑誌‘La Ricerca Scientifica’に発表した．1934年1月，フェルミはイタリアの学術雑誌‘Nuovo Cimento’とドイツの学術雑誌‘Zeiitschrift fur Physik’に総合解説を投稿した．双方の雑誌はこの論



フェルミ（左），ハイゼンベルグ（中），パウリ（右）1927年コモ湖にて．6年後にフェルミは，ハイゼンベルグの原子核相互作用のアイディアとパウリのニュートリノ仮説を結びつけて，大成功をおさめたベータ崩壊理論を作った．(AIP ニールス・ボーア図書，セグレ所蔵，ラセッティ撮影)

文の掲載を認めた．(この二重投稿の裏には，フェルミの綿密な策があった．それは，ファシスト政府は全ての科学成果の公表はイタリアで行うよう要求した．しかし，他国の科学者がイタリアの学術雑誌を読むことは稀であったため，この重要な論文をイタリアと同時にドイツでも発表することにした.)

この論文は物理学の古典の一つに数えられている．その中でフェルミは，原子核物理における新しい概念を避けようとはせず，それらの概念を把握し，ベータ崩壊の実験データを再現できるような強力な理論の道具立てに転用した．ほぼ60年の後でも，この理論は低エネルギー・ベータ崩壊を扱うどの理論よりも利用するに便利である．

では，フェルミがどのようにしてこの理論を導出したのか，その道筋を辿ってみよう．論文の序論で彼はベータ線の連続エネルギー分布が直面する問題点と，原子核が電子を保有する場合の問題点を明らかにした．そして，彼が

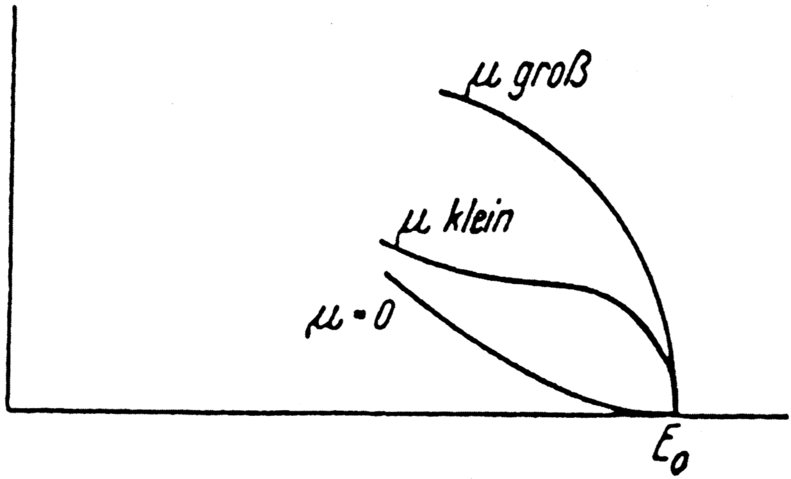


Fig. 1.

Zeitschrift fur Physik 誌 1934 年 88 巻 161 ページに掲載されたフェルミのベータ崩壊理論（Versuch einer Theeorie der β-Strahlen. I）の論文における図 1. この図は，電子のエネルギー分布における高エネルギー先端部の形状の計算結果が，電子と同時に放出されるニュートリノの質量を仮定することによって，どのように変化するかを示している．分布の形状測定は，もしあるとしてニュートリノがどれくらいの質量を持つかを決定する現在の多くの実験に対する指導原理となった．

考えたそれらの解決策につても，同じくらい明確に述べている．彼はパウリの仮説である質量の軽い中性粒子“ニュートリノ”が，ベータ崩壊において電子に伴って放出されることと，ハイゼンベルグの原子核が陽子と中性子の重い粒子だけで構成されるという仮説を採用した．彼はまったく新しい考えにためらうことがなかった．

次にフェルミはいくつかの付加すべき仮定について説明した．第一に，電子とニュートリノの崩壊前後の総数が必ずしも同一ではないこと，[31] つまり，電子やニュートリノはちょうど光子のように，生成または消滅するものと見なした．さらに，中性子から陽子への遷移が起こるたびに，電子とニュートリノの生成が関わると述べている．このことによって，電荷の保存則が満たされていることがわかる．[32]

もう一つフェルミの重要な仮定は，中性子に 1，陽子に − 1 のように重い粒子に対して 2 つの値のどちらかを割り当てる内部座標：量子数を使用したことである．これは，陽子と中性子が同一の基本粒子の異なった量子状態であるとするハイゼンベルグが導入した概念に従ったものである．(現在の理論では，この量子数は陽子に対して 1/2，中性子に対して −1/2 である)

フェルミ論文における次の展開は，重粒子（陽子と中性子），軽粒子（電子とニュートリノ）および，それらの粒子間に働く相互作用を含む全系のエネルギーを記述する方程式を設定することである．相互作用のエネルギーの項は，中性子が電子とニュートリノの生成を伴って陽子に転換する可能な遷移と，その逆過程である陽子が中性子に変わり，電子とニュートリノが消滅する過程をも含んでいなければならない．さらに，フェルミはこの相互作用が空間の一点，つまり重粒子の場所で起こると仮定した．

ディラックの輻射理論からの類推がこのあとに続く．ディラックはエネルギー方程式の中で 3 つの項：原子のエネルギー，輻射のエネルギー，相互作用のエネルギーを考察した．そして，相互作用項を他の 2 つの項に対して摂動として扱った．この近似がディラックの計算を実行可能にした．

フェルミはできる限りディラックの手法に忠実に従った．彼も重粒子と軽粒子のエネルギー項の中で相互作用項を摂動論で処理した．次に標準的な手法を用いて，関与する粒子がとりうる量子状態間の全ての可能な遷移を記述する方程式を導いた．この方程式の重要な点は，予言能力を持っていることである．フェルミは，今や起こりうる遷移確率を計算できる立場にあった．さらに重要なことは，ベータ線のエネルギー分布の形を再現してみせることができる点である．

ベータ崩壊におけるエネルギー分布は，それが連続分布をしていることが決定的になるまでの 20 年以上もの間，実験物理学者を悩ました．パウリがためらいながらもニュートリノをこの世に送り出してから 2 年後の今，フェルミは自身の理論を使って，ベータ線スペクトルの高エネルギー先端部分の形から，ニュートリノの質量の大小を論じることを可能にした．フェルミは論文の中で，ニュートリノの質量が 0，小，大の 3 つの場合のスペクトル図を示し，そして次のように述べている．

実験データにもっとも似ているエネルギー分布の形は，0質量の場合の計算結果によって示される．我々はそれゆえ，ニュートリノの静止質量は0か，または有限としても電子の質量と比較して非常に小さいと結論できる.[33]

ニュートリノはようやく定着した！

第3章

ニュートリノの正体?

誰もがニュートリノの存在を信じているとは言いがたい．しかし，ベータ崩壊を理解する手段として，ニュートリノ仮説の恩恵を受けない者は誰一人いないことは確かだ．[1]

リチャード・クレイン 1948.

“放射能淑女，紳士”に宛てたパウリの手紙が，ニュートリノの概念をしるしたとするなら，フェルミのベータ崩壊の論文はニュートリノの誕生を告げるものであった．チャドウィックによる中性子の発見は，パウリの“中性粒子”の導入が引起した原理的な困難のいくつかを取り除いた．そして今，フェルミ理論の中で第2の中性粒子，すなわちニュートリノの役割が明らかになった．中性子と異なり，ニュートリノは原子核内にもともとある粒子ではなく，ベータ崩壊の瞬間に生成される粒子である．他の多くの物理学者達も，ニュートリノについて真剣に考え始めた．そしてすぐに，どのような方法でニュートリノの存在を突き止めることできるのかと，問いを投げかけた．

素粒子は一般的に，まわりの物質との反応を通して検出される．陽子や電子などの荷電粒子は，それらが通過する物質を直接，電離する．言い替えるなら，荷電粒子は電磁相互作用によって物質中の原子から電子を蹴り出す．ある検出器の中では，粒子は通過後にイオンや電子の痕跡を残す．そして，その痕跡は雪原につけられた足跡のように，目に見える形に変換される．他の検出器では，イオンがぱっと現われる瞬間を記録して，それによって粒子が通過したことを検知する．この検出器は，フットボール競技場にある回転ゲー

トによって観客数を数えるように，粒子数の計測に使用される．

中性子や光子のような電気的に中性の粒子は，物質中で電離による痕跡を残さないが，間接的に検出される．光子は走行中に原子内の電子を蹴り出し，電子にエネルギーを与える．この電子が電離痕跡を作って検知される．中性子は原子核外に陽子をたたき出すことができるため，電荷を持った陽子による電離現象が起り，中性子の存在が示される．では，ニュートリノも同様にこれら中性粒子と同じ現象を通して検出できるだろうか？

当然のことながら，パウリはニュートリノ仮説を導入した時からすでに，この疑問について考察していた．そして，次のように考えた：“もし中性粒子が存在するなら，それらはガンマー線（光子）よりももっと物質透過力が強く（別の言い方では電離能力が弱く）なければならない．そうでなければ中性粒子はベータ崩壊の研究ですでに検出されているだろう．もっと透過力が強いとは一体どのくらいなのだろう．

1934年にフェルミの論文が発表されるとまもなく，ケンブリッジ大学のキャベンディッシュ研究所にいたチャドウィックは，D・E・リーと一緒にニュートリノの物質透過能力の測定を始めた．彼らはラジウム－Eを含んだ溶液を測定器から6 cm離れた場所に置き，ラジウムと測定器とのすき間に最大5.8 cmまでのいろんな厚さの鉛を挿入した．そして，鉛の遮蔽材を透過してくる粒子による電離現象を測定した．

ラジウムはベータ崩壊にともない電子を放出するが，この電子は鉛の中で止まってしまう．パウリとフェルミによればベータ崩壊の際に，ニュートリノも同時に放出されるはずである．鉛中で減速したニュートリノは間接的にではあるにしろ，何らかの電離現象を引起こす反応が期待された．しかし，チャドウィックとリーは最も厚い鉛（厚さ5.8 cm）の遮蔽を用いても，全く電離現象を検出することができなかった．そしてこの結果を用いて彼らは，ベータ崩壊に伴って放出されるどんな中性粒子も，空気中で1個の原子をイオン化するまでに，少なくとも平均150kmは走行できると見積もった．翌年，M.E.ナーミアスは地下30mにあるロンドンの地下鉄駅ホルボーンで同様な実験を行い，この距離を31,000kmにまで伸ばした．

そもそもニュートリノは物質と反応するのだろうか？ フェルミの論文のすぐ後に，2人のドイツ人物理学者，ハンス・ベーテとルドルフ・パイエルスは，

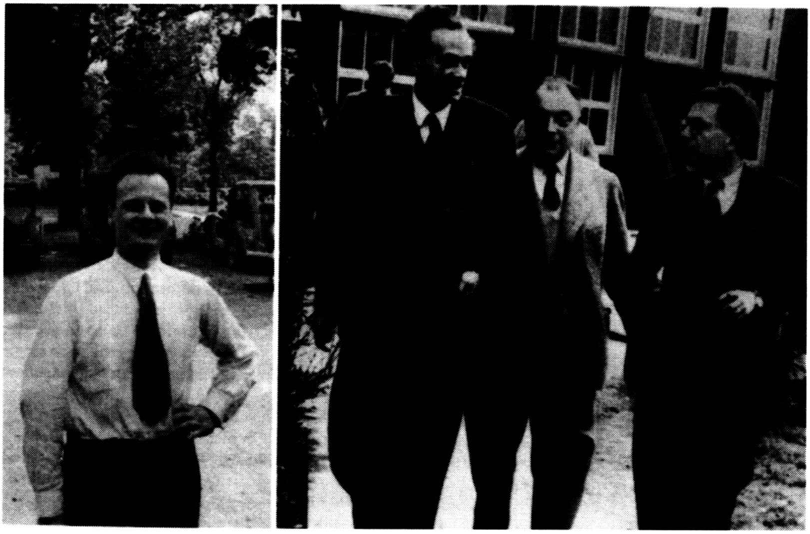
唯一可能と思われる検出方法を考察した．その考えとは，ニュートリノがベータ崩壊で生成されるなら，光子の生成や吸収と同様に，逆反応過程において吸収されないだろうか？ つまり，原子核がニュートリノを吸収して新しい原子核を作ると同時に，電子又は正電荷の電子を放出できるだろうか？” ということであった．

正電荷の電子，つまり陽電子は，チャドウィックが中性子を発見してから数ヶ月後の 1932 年に発見されたもう一つの素粒子である．それは電子と同じ質量を持ち，電荷が正である．この陽電子の存在は，それが発見される約 5 年前に発表されたディラックの理論的研究によってすでに予言されていた．

ディラックは 1927 − 28 年の冬にケンブリッジでまとめた電子論の中に，量子力学と特殊相対性理論を組み入れた．この理論は，光の速さに近い相対論的速さで運動する電子のエネルギーを正確に与えるディラック方程式として，現在広く知られている有名な方程式を導いた．しかしながら最初は，理論に欠陥があるように思われた．その欠陥とは，明らかに不合理に見える負のエネルギー値を持つ電子の存在を許すものであった．しかし，陽電子の発見によって正のエネルギー値を持つ正電荷粒子は，ディラックの理論に現れる負のエネルギー値を持った負電荷粒子と関連していることが明らかになった．彼の電子論はまさに電子と陽電子，または電子と反電子の理論であった．

中性子の発見をもう少しのところで逃したイレーネとジュリオ・キューリ夫妻は 1934 年の初めに，人工的に生成された軽い原子核の放射性崩壊において，陽電子が放出されることを見つけた．このことは，ベータ崩壊では関与する原子核に依存して，負電荷または正電荷の電子が生成されることを示している．しばしば逆ベータ崩壊と呼ばれている原子核によるニュートリノの吸収を考察するに至ったベーテとパイエルスは，同じく原子核の性質に依存して陽電子または電子が放出されると想定した．

この二人の理論家は，ニュートリノの吸収確率が当時知られていたあらゆる反応過程のどれよりも，遥かに小さい結果を導いた．原子核や素粒子物理学においてこのような確率は，領域あるいは断面積という表現を用いて与えられる．つまり，反応を起こす確率が大きければ大きいほど，断面積は大きくなる．ベーテとパイエルスが得た断面積は，10^{-44} cm^2 という想像を絶するほどの小さな値であり,[2] このことはニュートリノの検出が不可能なこと意



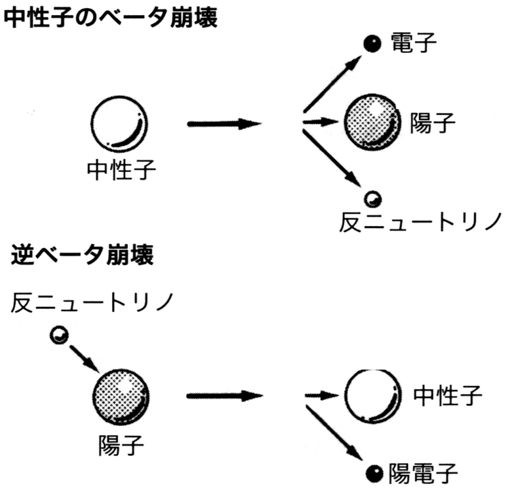
フェルミがベータ崩壊理論を発表した直後の1934年にベーテとパイエルスは，低エネルギーのニュートリノが物質と反応する確率を計算し，それが極めて小さいこと示した．左の写真は，1935年アン・アーバーでのベーテ．右の写真の中で，パウリの右側がパイエルス，左側はディラック．(提供：写真左，AIPニールス・ボーア図書館，ゴートスミット寄贈，写真右，AIPニールス・ボーア図書館)

味していることは明らかであった．

（ここで指数表示の一例がでてきた．この表示は普通，非常に大きい値や，小さい値を表わす時に使われる．例えば，10^6 は10を6回かけることを，10^{-6} は $1 \div 1{,}000{,}000$ を意味する．そこで，10^{-44} は $1 \div 10^{44}$ をすなわち，$1 \div$ [1の後に0が44個続く数] である.）

10^{-44} cm^2 の値が何を表わしているかを考えてみよう．水の分子は1個の酸素原子と2個の水素原子から構成されている．それぞれの水素原子核は1個の陽子であり，放射線源から出てくると考えられているニュートリノに対する標的になる．ニュートリノがこれらの標的陽子の一つに吸収される確率は，この反応過程の断面積と $1\mathrm{cm}^2$ 当たりに存在する標的陽子数の積で与えられる．

反応確率 = 断面積 × 単位面積当たりの標的数．水 1 cm^3 中には 7×10^{22} 個の自由陽子がある．ここで自由陽子とは，水素原子核のことであり，酸素原



中性子のベータ崩壊では，中性子が電子と反ニュートリノを放出して陽子に変わる．逆ベータ崩壊では，陽子が反ニュートリノを吸収して反電子（陽電子）を放出し，中性子に変化する．

子核の中で中性子と結合している束縛陽子とは状態を異にする．ベーテとパイエルスの計算に従えば，ニュートリノがこれらの自由陽子の 1 個に吸収される確率は，$10^{-44} \times 7 \times 10^{22} = 7 \times 10^{-22}$（1/cm）になる．つまり，ニュートリノが 1cm 厚の水の中で自由陽子によって吸収される割合は，10^{22} 分の 7，または約 10^{21} 分の 1 である．このことは，ニュートリノを吸収するのに 10^{21} cm の水の厚さを必要とする．

これは天文学的な長さである．すなわち，約 1,000 光年，あるいは地球－太陽間の距離の約 6,300 万倍に相当する．ベーテとパイエルスが断言したように，逆ベータ崩壊反応によってニュートリノを検出することなど，とうてい不可能なことであった．しかしながら，ほぼ 50 年後にパイエルスが述べているが，彼とベーテは莫大な量のニュートリノを生成する原子炉の出現や，
3 また，実験家の創意工夫の才を念頭に置いていなかった．2 人は，物理学者が原子核反応を起こすエネルギーの，幾千倍もの大きなエネルギーを持つニュートリノをいつしか手中にすることや，このようなニュートリノが物質と非常に頻繁に反応することなど考えも及ばなかった．この話は第 4 章と第

5章にでてくる．

ニュートリノの大量生産

私は，ニュートリノ理論に強い感銘を受けなかった．まともには，ニュートリノの存在を信じていないと言えるかもしれない．　・・・あえて言わしてもらえば，実験物理学者は，ニュートリノを自らの手で作り出すような発明の才を持っているだろうか？[4]

アーサー・エディントン，1939

英国の著名な天体物理学者エディントンが，彼の著書である『物理科学の哲学』の中でこのよう~~な~~に言っているとはいえ，時はすでに大量のニュートリノを生産する段階にきていた．1938年の後半にベルリンでハーンとフリッツ・シュトラスマンは，ウランに中性子を照射すると大きさがウラン原子核の約半分より小さなバリウム原子核が生成されることを発見した．

その夏，ヒットラーはオーストリアに侵攻し，ハーンの長年の共同研究者であったマイトナーはドイツから逃れた．彼女はユダヤ系で，その時60才に近かった．彼女のオーストリア国籍は，もはやナチの反ユダヤ主義から身を守ることを不可能にした．そして，彼女はストックホルムに安全の地を見つけた．12月19日そこにいるマイトナーに，ハーンは彼の驚くべき発見をしるした手紙を送った．その月のクリスマスに，マイトナーは甥の物理学者のオットー・フリッシュとの共同研究を開始し，この不思議な結果について議論した．彼らはウラン原子核が中性子を吸収することによって不安定になり，2つのより小さな，ほぼ等しい大きさの塊に分割すると考えた．マイトナーとフリッシュは，この反応過程を核分裂と名付けた．

しかし，2個の軽い原子核は核分裂における唯一の生成物ではなかった．マイトナーとフリッシュは，燃焼のような化学反応で得られるエネルギーの百万倍以上ものエネルギーが，核分裂によって解放されることを示した．その4ヶ月後に，パリのフレデリック・ジュリオーキューリと彼の共同研究者が，核分裂にともなって数個の中性子も同時に放出されることを見つけた．もはや物理学者が，ウラン塊の中でこれらの中性子を引き続き核分裂を誘発させることに利用するに時間を要しなかった．すなわち少量のウラン塊から，莫

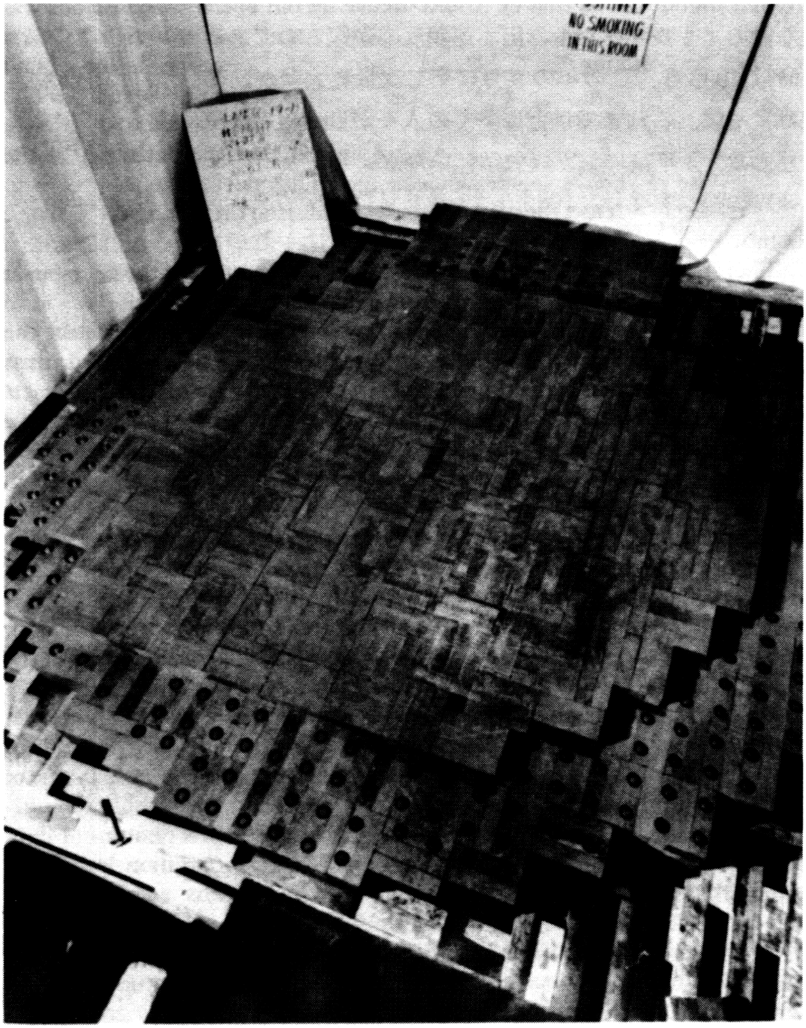
大な量のエネルギーを生み出す連鎖反応が起るのである．

時は 1939 年，この年の 9 月に第二次世界大戦が勃発した．原子核物理学者はすぐに，これまで以上に多くの人々が自分達の仕事に注目していることを感じた．3 年後にシカゴ大学にいたフェルミとその研究チームは，アメリカ政府の援助を受け，1942 年 12 月 2 日に大学のテニスコートの地下に作られた原子炉で，最初の人工制御による連鎖反応を実現した．このことは，アメリカがニューメキシコ州の片田舎にあるロスアラモス研究所で，世界最初の原子爆弾の製造に取りかかる決定的な第一歩であった．1945 年 7 月 16 日，ニューメキシコ州の砂漠で行われた，いわゆるトリニティ・テストで原子爆弾は炸裂した．そして，その 4 週間以内にアメリカは，日本の 2 つの都市，広島と長崎に原子爆弾を投下した．

原子爆弾は，核分裂の連鎖反応を急速に加速しながら，大量破壊をもたらす爆風をともなって熱エネルギーを放出する．これに対して原子炉の中では，連鎖反応は注意深く制御されるため，エネルギーは安定に放出される．しかし両方のいずれの場合も，ウランの核分裂に伴ってもう一つの生成物がまったく気づかれることなく，またはかろうじて人目をひきながら抜け出てくる．すなわち，核分裂が起きるたびに数個のニュートリノが放出されるのである．

ニュートリノは核分裂反応において，直接作られるのではなく，核分裂後の原子核から放出される．これらの核分裂片は，通常は不安定な放射性原子核であり，ニュートリノを放出するベータ崩壊を繰り返して，より安定な原子核へと壊変する．その結果，原子爆弾や原子炉中の 1 塊のウランから，膨大な数のニュートリノが出てくる．

戦争の終結とともに，アメリカの原子爆弾プロジェクトに携わった科学者達は解散し，もとの研究生活に戻った．しかし，幾人かはロスアラモスに留まった．そして 1951 年にそのうちの一人は，一生涯の研究に値する価値ある研究テーマを求めて，道なき道をじっと見つめる自分に気付いていた．[5] その人とはフレッド・ライネス，33 才であった．彼は原子爆弾を兵器としてではなく，それを基礎物理学研究への適用を検討する目的で，滞在を許可された．名案はそうすぐには浮かんでこなかったが，ライネスがおぼろげながらの思索の中から掘りあてたものは，原子爆弾によって生成されるニュートリノを直接検出することであった．[6]



建設中の大量ニュートリノ供給源．1942 年 11 月にシカゴ大学の地下に建設された世界初の人工原子炉．（提供：アルゴンヌ国立研究所，AIP ニールス・ボーア図書館）

この漠然とした考えは，ライネスがカンサス・シティ空港で，ロスアラモス研究所のもう一人の物理学者，クライド・コーワンと共に足止めをくった後に，より実質的な意味を持つようになった．時間つぶしの間に二人は，物

理学における興味深い研究テーマの議論に没頭した．そして，ニュートリノの検出は究極の挑戦に値するという点で意見が一致した．彼らは原子爆弾のテスト実験の際に放出されるニュートリノの検出方法を，協力して検討することにした．

彼らの基本的な目標は明白であった．それは爆発点から離れた場所で，ニュートリノ反応を検出することである.[7] 測定すべき反応が逆ベータ崩壊反応であることは明らかであるが，いかにしてこの反応を検出するかが課題であった．逆ベータ崩壊反応では，陽子はニュートリノを吸収して陽電子を放出すると同時に，それ自身中性子に変わる．陽電子は即座に回りにいる電子と反応する．この粒子と反粒子は対消滅として知られている反応過程によって，エネルギーに転換する．その結果 2 つのガンマー線，すなわち高エネルギーの光子が正反対の方向に走り出す．

コーワンとライネスは，これらのガンマー線の測定を通して陽電子を検出する方法に習知しており，中性子を同定することがより困難であるため，これで十分であると考えた．(厳密に言うなら，この反応では陽電子が放出されるために，陽子が吸収するのは反ニュートリノである．反ニュートリノはこの章の後で出てくる話題であるため，ここでは単にニュートリノと呼ぶことにする.)

1950 年に入ると，いくつかのグループの研究者達が蛍光（シンチレーション光）を発する有機液体（液体シンチレータ）を発見した．この液体は，荷電粒子が物質中の原子をイオン化すると，その直後に弱い閃光を発する．この光は，光電子増倍管（特殊な物質が塗ってある表面を光が叩くと電子増殖を引き起こす装置）によって，電気信号に変換される．ガンマー線は間接的にイオン化を誘発するので，シンチレーション光は発光物質の中で対消滅する陽電子の死を記録する．ここで発光物質は，逆ベータ崩壊反応の陽子標的であると同時に，検出器としての役割も果たす．

ライネスとコーワンは，数本の光電子増倍管が内部を見張るような液体シンチレータタンクを用いて，それを原子爆弾の爆発地点から約 40m 離れた地下の立坑に吊るすことにした．この立坑の中の空気は排気しておく．このようにすると，爆発の瞬間に測定器を立抗の真空槽内で自由落下させれば，爆発による衝撃波の影響が回避できる．衝撃波が通り過ぎるやいなや，測定器

は羽や気泡ゴムのマットの上に着地する．この装置は，原子爆弾の核分裂片から生成されるニュートリノが液体シンチレータ内にどっとやってきて，その時に作る陽電子が発するシンチレーション光を検出するだろう．周囲の地面は爆発を避けるとともに，核分裂によって生じた他の種類の粒子を吸収する役目をする．

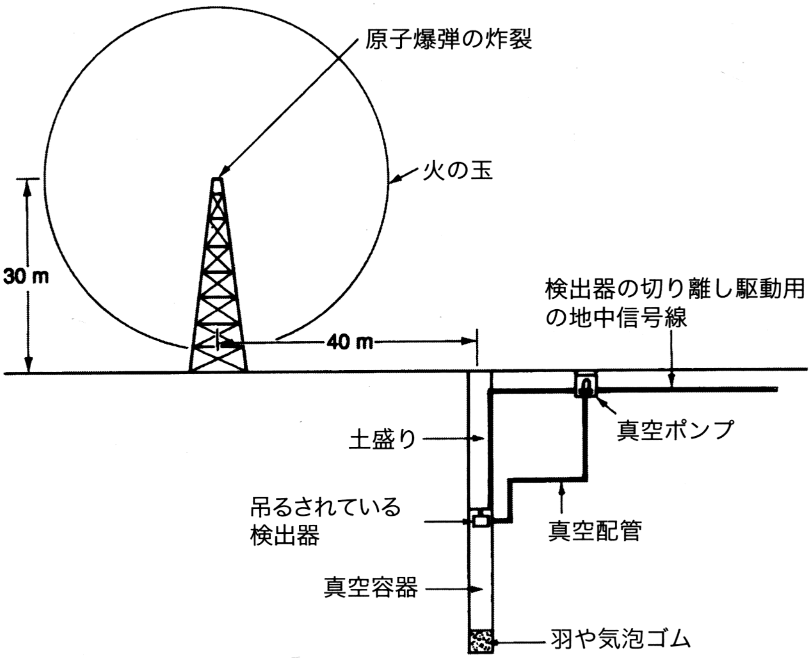
この計画はびっくり仰天させるようなものであったが，2人はいたって平静であったとライネスは当時を次のように振り返っている：

このような精密機器を，人間が作り出した中でもっとも破壊力のある爆発から100m以内に近づけて作動させる考えはかなり奇抜であったが，我々は原子爆弾の仕事に携わってきた経験から，この実験に適した装置を設計できると信じていた．[8]

この自信は報われた．それはこの実験が行われたからではなく，むしろ，それがもはや実行されなかったためである．実は，コーワンとライネスは計画をさらに詳細に煮詰めるにつれて，原子爆弾ほどは突飛なニュートリノ源ではないが，原子炉を使用することが可能であることに気付いた．

逆ベータ崩壊の際に陽電子とともに生成される中性子は，自由な中性子と同じように掴まえ所がない．それはちょうど，人ごみの中の酔っ払いに似ていて，物質中で原子核に次々とぶつかってはエネルギーを失い，よろめきながら進む．そして，しまいには原子核に吸収されてしまう．このような現象は中性子を吸収した原子核が再結合を起こし，過剰なエネルギーを解放するためにガンマー線を放出する前ぶれである．その結果，2番目の閃光となるガンマー線によるシンチレーション光は，ちょうど陽電子の対消滅を示す最初のシンチレーション光のように中性子が捕獲されたことを知らせてくれる．

この測定手法を用いてニュートリノの検出を実現しようとする場合の決め手は，中性子が生成された場所から吸収される場所に辿り着くまでのジグザグ経路にある．これは，ちょうど酔っ払いがバーから出て歩き回り，最後に道路にうずくまるまでを特徴づける時間間隔に相当するもので，シンチレータは固有の平均時間を持つ．そのため，逆ベータ崩壊反応における2つのシンチレーション光の閃光は，密接な時間相関を持っている．中性子による発光は陽電子による発光の後，決まった時間だけ遅れて生じなければならない．この遅延時間は，中性子とシンチレータ物質との間の相互作用から計算でき



ライネスとコーワンはニュートリノを検出する最初の案として，原子爆弾の爆発によって生成される数十億個のニュートリノの一部を捕獲する計画を立てた.（提供：スミソニアン研究所，1964 年のスミソニアン・レポート，419 ページより）

る．逆ベータ崩壊反応で生成される中性子が，使用する液体シンチレータ内をさまよい吸収されるまでの遅延時間は約 5 マイクロ秒（5×10^{-6} 秒）である．

ライネスとコーワンは，液体シンチレータの中で起る陽電子と中性子による閃光の遅れが，逆ベータ崩壊反応に固有の信号を提供することを理解していた．約 5 マイクロ秒の時間だけ隔たった 2 組の発光を探すことによって，彼らは検出器に飛び込んでくる他のいろんな粒子が引き起こす，招かざる客，つまり無秩序な時間間隔で起る発光を除去することができた．

検出器を原子炉の近くに設置する場合，特徴的な発光時間の遅れが逆ベータ崩壊現象とそうでないバックグランド現象とを十分に区別してくれる。このことから，原子爆弾なしでもこの実験が可能であることに突如，気付いた．

それは彼らがまだ，原子爆弾から放出されるニュートリノ検出の実験計画を検討している際中であった．

ニュートリノの発見

ハンフォードでの日々は，興奮と疲労の連続であった．数ヶ月間，我々は数百トンの鉛やボロン入りパラフィンの遮蔽材を積み上げたり，崩したりしていた．そしてまた，汚いシンチレータ・パイプや，シンチレータの溶媒であるトルエンで侵され壁から剥げ落ちた反射材の白色ペイント，中性子吸収材のカドミウム・プロピオン酸・・・などを相手に一日中格闘していた．[9]

フレッド・ライネス，1982

コーワンとライネスは，ワシントン州にあるハンフォード・エンジニアリング社の原子炉の一つに，彼らの第一号ニュートリノ検出器の設置にとりかかった．かくして，ニュートリノの掴み所のなさにちなんで名付けられたポルターガイスト（いたずら好きの音の精）計画が始まった．検出器本体は，約300リットルの液体シンチレータを蓄えた円筒形の桶でできていて，この桶の壁面には90本の光電子増倍管が取り付けられ，液体シンチレータを監視していた．鉛とボロン入りパラフィンは，原子炉の炉心で起る核分裂反応によって飛び出した中性子や荷電粒子の流束を遮蔽するために，検出器を取り囲むように積まれた．一方，カドミウム・プロピオン酸は，液体シンチレータ中の逆ベータ崩壊反応によって作られる中性子の捕獲効率を向上させるために，液体シンチレータに添加された．

この実験の難しい点は，なんと言ってもバックグランドであった．バックグランドとは，原子炉が稼動している，いないに拘わらず，逆ベータ崩壊反応と同じ時間間隔を持って検出器内で発生する対発光のことである．主なバックグランド源は，5マイクロ秒の時間幅の間に反応を起こす，中性子を含む宇宙線であった．(宇宙線とは，地球大気を透過してシャワーのように降り注ぐ素粒子の一群であり，これらの粒子は，宇宙を飛び交う高エネルギー粒子が大気上層で空気の原子核（酸素と窒素）と衝突する際に生成される.）

計算では，逆ベータ崩壊に特有の5マイクロ秒の遅れを持つ対発光（遅延同時計数）が，5～10分に1回起るはずであった．しかし実験では，原子炉

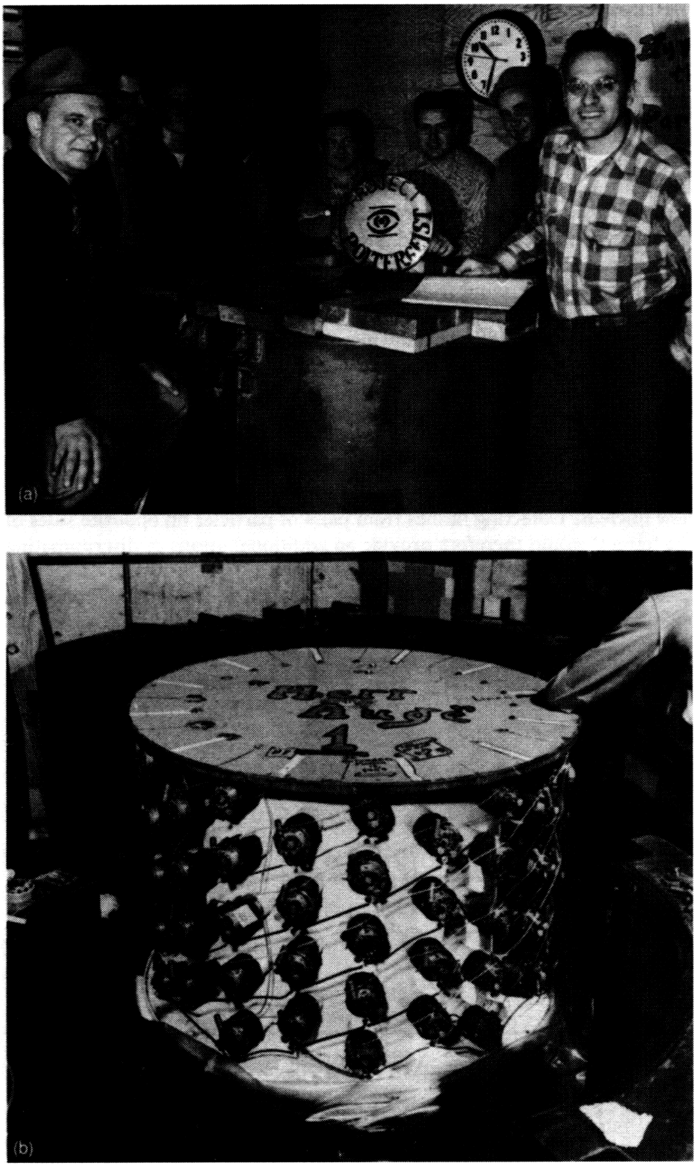
の ON/OFF に関係なく，1 分間に約 5 回の同時計数が検出された．とはいえ，原子炉が運転中の時には，検出率に僅かではあるが判別できるほどの増加があった．この検出頻度はまさに予測される量と一致した．

ライネスとコーワンは勇気づけられた．1953 年の暮れに発表された論文の中で彼らは，ニュートリノを検出する目的は達成されたと言ってよいだろうと述べている.[10] しかし，彼らはより説得力のある証拠の必要性を認めていた．そこで，不規則に起る宇宙線反応のバックグランド現象の山の中から，逆ベータ崩壊による同時計数信号を見つけ出す，もっと効率のよい新しい検出器の設計に取りかかった．

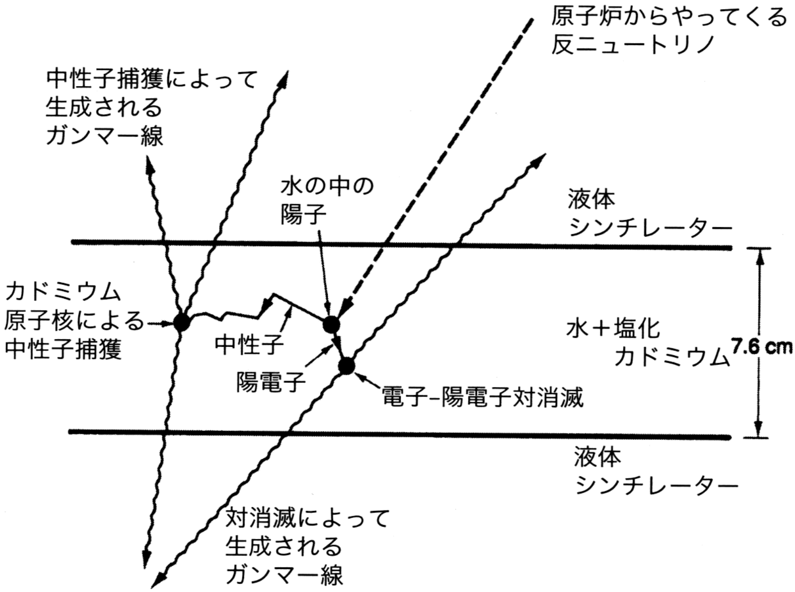
1955 年の秋に，アメリカの著名な物理学者ジョン・ウィラーに励まされて，コーワンとライネスは改良した検出器を，今度は新しく南キャロライナ州サヴァンナ・リヴァーに建設された高出力の原子炉に設置した．ここで彼らは，炉心から 11m 離れた地下 12m の場所に検出器を置いて，バックグランドを遮蔽した．これは，宇宙線がもたらす致命的なバックグランド現象を減少させるために，不可欠であった．その上，強力な原子炉は，ハンフォードの原子炉に比べて桁違いの核分裂を引き起こした．ちなみに，毎秒・1cm^2 当たり検出器にやってくるニュートリノの数は 10 兆個以上であった．

新しい検出器の設計にあたってコーワンとライネスは，陽電子が物質中で電子と対消滅する時，運動量保存則に従ってほぼ正反対方向に走行する 2 本のガンマー線の痕跡が残ることを利用することにした．そして，次に原子核が中性子を捕獲すると，新しく作られた原子核から数本のガンマー線が四方に放出される．それゆえ，標的の正反対の両側で粒子対による発光を検出することは，招かざる客“バックグランド反応”を除去する新たな手段を提供する．

でき上がった装置は巨大なサンドウィッチに似ていた．それは 3 台の液体シンチレータ槽と，それぞれの間に挟まれ水を満たした 2 台の標的槽から構成されていた．水中の陽子が原子炉からくるニュートリノを吸収すると，生成された陽電子は対消滅して直ちに 2 本のガンマー線を放出する．ガンマー線は正反対の方向に進み，標的槽の真上と真下にある液体シンチレータ槽の中で減速する．このようにして，ガンマー線はそれぞれの槽内で同時に発光を引き起こし，光電子増倍管によって検知される．5 マイクロ秒後にもう一



(a) ポルターガイスト（音の精）・プロジェクトチームの人達と一緒のコーワン（左端）とライネス（右端）．この初期のニュートリノ検出器は，彼らの実験手法の有効性を証明した．(b) 検出器は，90 本の光電子増倍管に取り囲まれた 300 リットル液体シンチレータ槽からできている．この実験以前は，20 リットルの液体シンチレータ槽でも大きく見えた！(提供：ロスアラモス国立研究所)

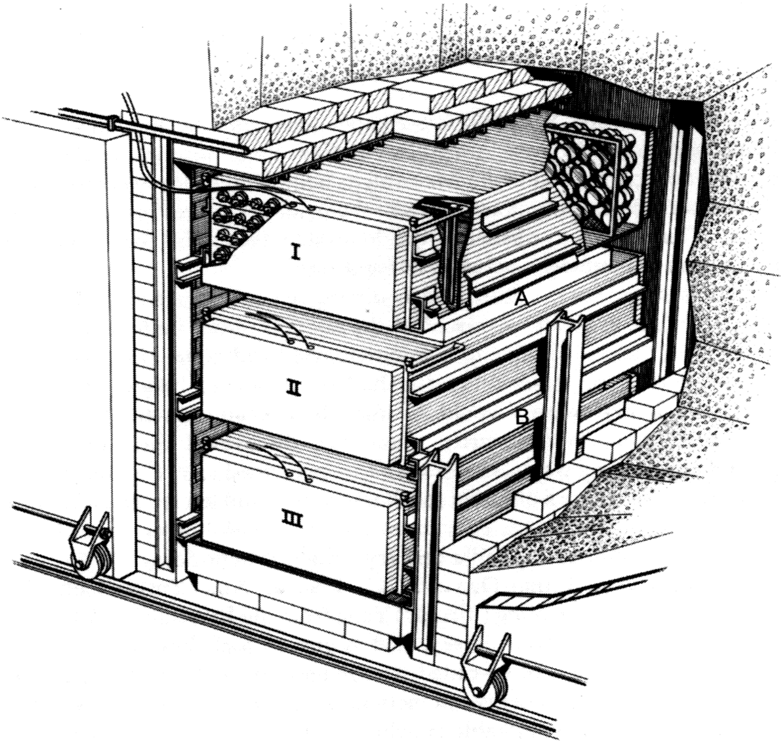


ライネスとコーワンはニュートリノを検出するために，最終的に3段階の反応過程を利用した．最初は水中の陽子がニュートリノを吸収し，中性子と陽電子を生成する過程．次に，ほぼ同時に陽電子が電子と対消滅し，2本のガンマー線が正反対方向に放出される．これらのガンマー線は隣接する液体シンチレータ槽で検出される．最後に，対消滅ガンマー線の発生から約5マイクロ秒後に，中性子がカドミウム原子核に捕獲されて数本のガンマー線を放出する過程．

つの同時に起こる対発光が，同じ2つのシンチレータ槽内で発生する．今度は，中性子捕獲の後に放出されるガンマー線によるものである．水に溶け込んでいる塩化カドミウムが中性子の捕獲を確認する．

この装置の総重量は遮蔽材抜きで10トン，高さは2mもあった．それぞれのシンチレータ槽には1,400リットルの液体シンチレータが満たされ，110本の光電子増倍管によって監視されていた．シンチレータ槽は鉄製で，低エネルギーのガンマー線が透過できるように屋根蓋と底板は薄くしてあった．標的槽はポリエチレン製で，それぞれに200リットルの水が満たされていた．

コーワンとライネスはフランシス・ハリソン，ヘラルド・クルーズ，オースチン・マクガイヤーらと協力して，約1年の間に計100日間，検出器を運



ライネスとコーワンが，南キャロライナ州サバンナ川の大出力原子炉から飛んでくるニュートリノを検出した最終実験装置．I，II，III のラベルがつけられた大型槽は液体シンチレータを蓄え，それぞれが 110 本の光電子増倍管によって監視されている．液体シンチレータ槽に囲まれた小さい A，B 槽は，塩化カドミウムを溶かした水で満たされている．（フィジカル・レビュー誌 1960 年 117 号 160 ページより）

転した．この間，原子炉が稼動していた時には，1時間当たり平均3個の遅延同時現象，すなわち2つのシンチレータ槽の中で特定の時間間隔を持つ2組の対発光事象を観測した．彼らはまた，何回も検出器の性能を確かめるためのテスト実験を行った．例えば，光電子増倍管から送られてくる先発対発光の信号が，陽電子源の ^{64}Cu を標的槽内の水に溶かすことによって生じる対発光信号と同じことの確認；また，標的槽内のカドミウムの量を2倍にして，遅発対発光の遅延時間の減少を調べ，観測された発光現象が確かに中性子捕獲によるものであることの確認；カドミウムを使用しない場合，原子炉

の運転中でも所定の時間間隔に2つの対発光が観測されないことの確認などであった．

これらのテスト実験を行った後に，ついに彼らは観測結果を確信できた．“新しい知見の探求にこんなに身近にかかわれたなんて，光栄の一言に尽きる”とライネスは当時を振り返った．[11] 1956年6月14日，彼とコーワンはパウリに電報で実験の成功を次のように報告した：

我々は陽子の逆ベータ崩壊を観測することによって，核分裂物質から生成されるニュートリノを確実に検出できたことをお知らせすることは喜びにたえません．観測された反応断面積は $6 \times 10^{-44} \mathrm{cm}^2$ で，予想値とよく一致しています．[12]

パリティの死

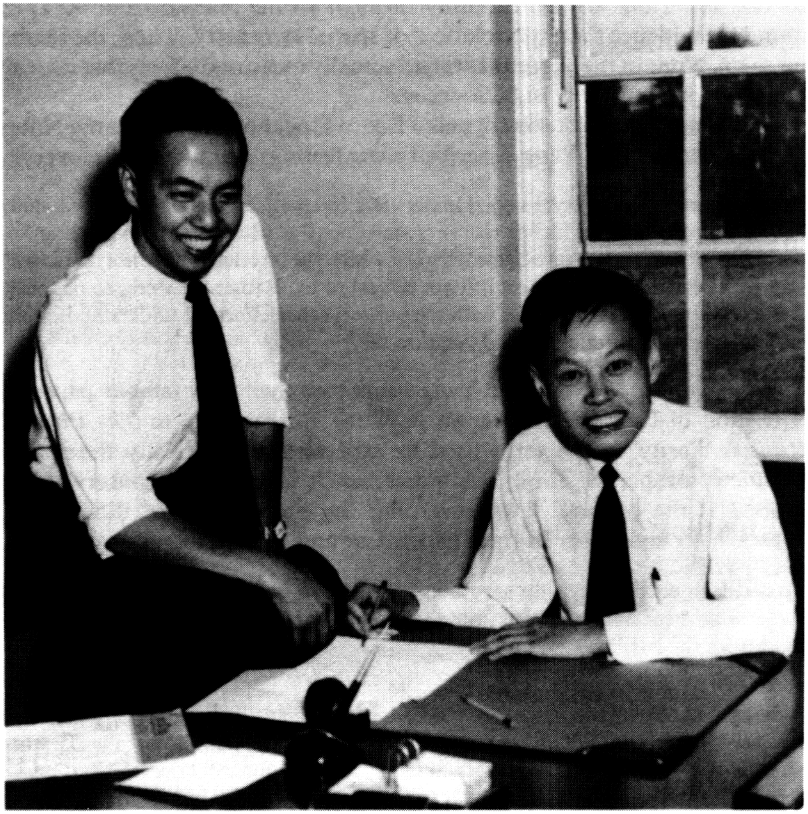
…左右対称性の概念は，人間が市民権を獲得したことと同じくらい古く…長い間，過去の哲学者達によって議論されてきた．[13]

チェン－ニン・ヤン，ノーベル講演，1957

ロスアラアモス研究所のコーワンとライネスがパウリに電報を送ったまさにその時，ニューヨークにいたアメリカ国籍を持つ2人の若い中国人は，物理学上の常識となっている概念をくつがえすことに苦闘していた．彼らの考えは，20年以上に渡って認められてきたフェルミのベータ崩壊理論に，初めて重大な修正を与えるものであった．彼らは物理学の基本法則は左右対称であるという，長い間，信じられてきた概念にあえて立ち向かった．

我々人間のスケールの世界では，左と右は区別される．我々の心臓は体の左側にある．また，多くの人達は自分が左利きか，または右利きかを認識できる．しかし，1957年まで大多数の物理学者は，自然界の基本法則が左右非対称であると信じるにたる根拠を持っていなかった．

1957年になって物理学者達がこれまで仮定してきた空間の対称性を否定するような現象，つまり左と右を入れ替えた時に異なる結果を与える実験事実を目の前にした時，その驚きは想像を絶するものであった．さらに驚くべきことは，この発見が半世紀に渡って研究され，良く理解されている物理の研究分野，原子核のベータ崩壊の中から出てきたことであった．



1956年に，弱い力による相互作用が，長い間仮定されてきた左右対称性を破ることを提案したリー（左）とヤン（右）．1年後に彼らは，この業績でノーベル賞を受賞した.（提供：AIP ニールス・ボーア図書館，アラン・W・リチャード撮影）

1956年4月，ニューヨークにあるコロンビア大学のツン・ダオ（“T.D.”）・リーと，ニュージャージ州プリンストン高等物理学研究所のヤンは，高エネルギー宇宙線現象の中で発見された短寿命粒子，いわゆる奇妙な粒子（ストレンジ粒子）の崩懐に関する未解決の問題に取り組んでいた．その年の初夏までに，彼らは驚くべき結論にたどり着いた．もし素粒子の崩懐現象が左右対称性を破るなら，この難問は解決できることを示した．

1950年代までの研究によって多くの素粒子の崩壊は，ベータ崩壊と同じ作

用に起因することが明らかになった．このことは，電磁気力が荷電粒子間の相互作用を引き起こすように，崩壊を支配する新しい力の概念を導入するものである（この話は第4章で述べる）．崩壊やそれに関連する反応，例えばニュートリノの吸収によって起る逆ベータ崩壊反応などは，電磁相互作用と比較して非常にゆっくり進行する．このため，新しい力は“弱い力”と呼ばれるようになった．これらの研究成果から，フェルミ理論は弱い力の第一理論としての新しい役割を担うことになった．以上の状況がリーとヤンの発見の背景にあった．

彼らは，奇妙な粒子の崩壊例に見られるような弱い力が媒介する相互作用が，左右対称性を破るのではないかと疑った．しかし，このことは途方もない“仮定”であった．なぜ弱い力は他の物理的力とこの点で異なるのか？ なぜこれまで誰も気付かなかったのか？ すでにこれまでに，弱い相互作用の典型であるベータ崩壊に関して，大量の実験データが存在していた．そこで，リーとヤンは弱い相互作用に関連する実験結果を注意深く検討した．彼らはどこにも空間の対称性を破るような証拠を発見できなかった．この時，彼らの頭の中に一つのヒントがよぎった．“ベータ崩壊の実験のどれもが，左右対称性に依存するような効果を実際に測定していないのではないか！”

一年後にヤンはリーと共にノーベル賞を受賞するためにストックホルムへ向かった時，彼らの発見についての感想を次のように語った：

> 弱い相互作用における左右対称性が，長い間，実験による検証もなく信じられてきたという事実に驚きを感じる．しかし，もっと驚くべきことは，物理学者が確かであると思い込んできた空間と時間の対称性の法則が，破れているかもしれないという可能性である．この可能性は我々に直接，問い掛けてこなかった．むしろ，“奇妙な粒子のパズル”を理解するための諸々の解決策が暗礁に乗りあげたことによって，そこにたどりついたのである．[14]

1956年6月22日にリーとヤンは，今日，著名な論文になっている“弱い相互作用におけるパリティ保存の疑問”をフィジカル・レビュー誌に投稿した．“パリティ”とは，物理的現象の空間対称性を数学的に表わすために用いられた言葉である．現象を支配する物理法則が右と左を区別しない場合，パリティは保存するという．この論文の中でリーとヤンは，

“弱い相互作用でパリティが保存するかどうかを疑う余地なく決定するには，弱い相互作用が左と右を差別することを調べる実験を行わなければならない”[15]

と書いている．この後に，彼らは可能な実験を提案した．その冒頭を引用すると，

“比較的簡単な方法は，偏極した原子核のベータ崩壊によって放出される電子の角度分布を測定することである．この時，角度分布が非対称を示せば，これがベータ崩壊におけるパリティ非保存の紛れもない証拠になる．”[16]

ヤンとリーは多くの有能な実験家と綿密に連絡を取り合った．ヤンは頻繁にニューヨークのロングアイランドにあるブルックヘーブン国立研究所に出向いた．一方，リーが在職していたコロンビア大学の物理学教室は，多くの優秀な物理学者を集めていた．リーの研究室の数階上には，ベータ崩壊実験の優れた専門家であるチェン・シユン・ウー女史がいた．彼女は二人の理論家の考えに興味を抱き，ベータ崩壊を起こす質量数60のコバルトを使用する実験を提案した．彼女のアイディアは，コバルト原子核を磁場の中に置いて原子核スピンを磁場に平行になるよう偏極させることであった.（第2章で簡単に述べたように，多くの原子核はまるで回転しているような振る舞い（スピン）を示すことを思い出してください）

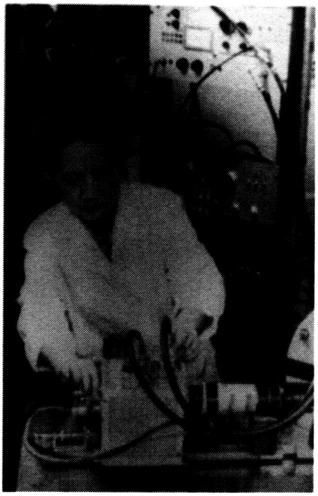
このような方法でコバルト60を偏極させるためには，絶対温度零度よりわずかに高いくらいの極低温での実験技術が要求された．このような低温環境は，原子核の整列を乱す熱運動を最小にする．そこでウーは，ワシントンにある国立基準局低温研究所のアーネスト・アムブラーと彼の率いる研究チームと連絡を取り合った．彼らは共同で，ベータ崩壊における左右対称性を調べる実験装置の考案・製作を開始した．作業は1956年後半の半年間の大部分を費やした．

そして12月29日，リーは重大な電話呼び出しをウーから受けた．

確かにコバルト60の実験結果はパリティ非保存を示した．しかし，非保存度の正確な大きさを確認するには，さらなる実験のつめが必要であると彼女は私に告げた.[17]

5日後の1957年1月3日，ウーはリーの研究室に現れた．

彼女はあらゆる補正すべき事項を調べた結果，非保存の効果は非常に大きいと言った．



ウー女史，1957 年コロンビア大学の研究室で撮影．この年にベータ崩壊が左右非対称で，それゆえパリティまたは空間対称性を破ることを発見した彼女の論文が発表された．(提供：AIP ニールス・ボーア図書館)

私は彼女の結果のすばらしさを確信して，すぐにプリンストンのヤンに電話した．[18]

ウーとアムブラーそれに共同研究者達は，複雑な実験装置の組立てに丸 6ヶ月を費やした．しかし，実験が始まってから発見にいたるまで，多くの時間を必要としなかった．彼らはコバルト 60 のスピンを整列させるとすぐに，ベータ線電子は等方的に出ていないことを見つけた．実は，磁場の向きと反対方向に出てくる電子が多かった．アムブラーとウーが磁場の向きを逆にした時，電子の放出方向もまた逆になった．この非対称性はリーとヤンが要求した確かな証拠であった．ベータ崩壊におけるパリティ保存は消え去り，物理学の世界は仰天するような騒ぎになった．

パウリはウーとアムブラーが行う実験について最初に聞いた時，ビクター・ワイスコッフ宛ての手紙に，実験結果が対称性を示す方に大金を賭けたいと書いた．大きな非対称度の測定結果の知らせが彼に届くと，再びワイスコッフに手紙を書いた：

今，最初のショックがおさまり，落ち着きを取り戻し始めた．私は賭けをしなくて良

かった．そうでなければ，(準備できないような) 大金を失う羽目になっていた．私は馬鹿をさらけ出したが，そう考えざるを得なかった．他の人達は今，私を嘲笑する権利がある．[19]

吸血鬼ニュートリノ

ニュートリノを鏡に映しても，何も見えない[20]

アブダス・サラム，1957

ウーと共同研究者達がパリティの破れを最初に発見する3ヶ月前の1956年9月に，ヤンはシアトルで開催された理論物理学国際会議で“新粒子についての新しい理解”という題目の講演を行った．そこで彼は奇妙な粒子の問題を議論し，パリティ非保存の可能性を提起した．聴衆の中にいた一人は，アメリカ空軍の好意による飛行機でロンドンに戻る途中に，ヤンの提案が強く自分に付きまとい続けていることに気づいていた．その人とは，英国のキャベンディッシュ研究所で研究していたパキスタン人のサラムであった．彼は次のように回想している：

飛行機は兵士達の子供の泣き声がひどく，苦痛でとても寝付ける状態ではなかった．私は“自然がなぜ弱い相互作用において左右の対称性を破るのか”と絶えず自問していた．[21]

サラムはこれを解く全ての鍵が，弱い相互作用の大部分を特徴づけるニュートリノにあると信じた．彼は博士号取得試験で問われた“なぜニュートリノの質量はほとんどゼロなのか”という質問を思い出した．そして，

寝心地の悪いその夜に答えが浮かんだ…自然は，正確に光速で運動する質量＝0のニュートリという美的な満足を与える一方で，左右の対称性を破るような理論と，左右の対称性を保存するが，ニュートリノは僅かな質量を持つような理論との選択をしたのだ．

その時私には，自然がどれを選択しなければならないのかが明らかになった…私は次の日の朝，飛行機を降りた．そして寝不足も忘れ元気を取り戻した．[22]

彼は電子に対するディラック方程式を質量0の粒子に適用すると，理論は左右対称性を破ることに気付いた．



パウリ（1957 年にウーと一緒に撮影）は，最初のうちは弱い力によってパリティが破れることを信じなかった．しかし，ウーと協力者による実験結果は，彼が間違っていることをはっきりと示した．(提供：AIP ニールス・ボーア図書館)

サラムはケンブリッジのキャベンディッシュ研究所に急いで戻り，博士号取得試験で質問したバーミンガムにいるパイエルスを訪問し再び討論する前

に，種々の影響について計算した．パイエルスは彼の新しい発見による解答を受け入れなかった．

私は，左右対称性が弱い力によって破られることを全く信じていない．そのため，このような解答にかかわる気はない．[23]

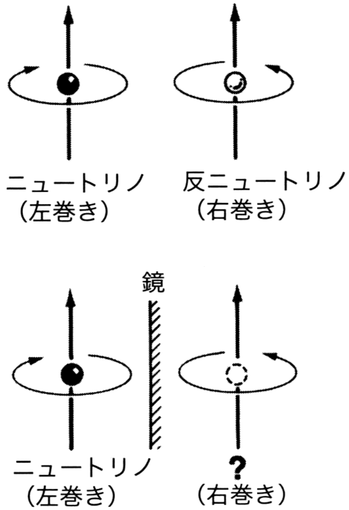
サラムは後で再び親切な言い回しとはいえ，パウリによっても落胆させられた．

私の友，サラムによろしく伝えて下さい．そして，何かもっと良いことを考えるようにと言って下さい．[24]

そのあとで，呆然とさせられる知らせがウーとアムブラーから届いた．自然はまさにパリティを破る弱い相互作用の選択肢を選んだようであった．

リーとヤンは，ニュートリノに対するパリティの破れの影響も検討した．ウーによるパリティの破れの実験結果を知らせる電話から2週間もたたない1月10日，彼らはフィジカル・レビュー誌にニュートリノの新理論についての論文を投稿した．サラムと同様に彼らは，パリティの破れが質量0のニュートリノに対するディラック方程式から引き出されることを示した．彼らはさらにニュートリノを記述する方法として，電子のような有限質量を持つ粒子に要求される4成分を用いる代わりに，2成分で単純化した．このことはとりもなおさず，ニュートリノには2つの状態が存在することを意味する：つまり，運動の方向または正反対方向のどちらかにスピン軸が向いているニュートリノと，その逆方向にスピン軸を持つ反ニュートリノの状態である．ニュートリノ（反ニュートリノ）が両方向にスピン軸を持つことは禁止される．

このことは，弱い相互作用におけるパリティの破れの本質が，空間の非対称性になって現われているように見える．空間の左右を入れ替える鏡でニュートリノを見てみよう．その時，どんなふうに見えるだろうか？ スピンと同じ向きに走っている粒子は，鏡の中では互いの向きは正反対になる．しかし，この粒子はニュートリノではありえない．ニュートリノは運動方向に対して決まった方向のスピン軸を持つ．ニュートリノは中世の物語に出てくる吸血鬼のようである，つまり，鏡映像がない（吸血鬼は光を嫌う）．



ニュートリノは運動方向に対して1方向，つまり反時計回りの左巻きネジのスピンを持つ．一方，反ニュートリノのスピンは逆方向の右巻きネジに対応する．ニュートリノをパリティ反転鏡で見ると，スピンは反転するが運動方向は変化しない．そこで，反転鏡の中のニュートリノは実在するニュートリノと異なる巻き方＝ヘィシティを持つことになる．

ニュートリノは左巻き

曖昧な記述は二重の定義が使用されることを容認していた：反ニュートリノはベータ崩壊において電子とともに生成される粒子として，または，進行方向に対して左巻き回転する粒子として定義された．しばらくの間，あたかもこの定義が実験にとって代わっているかのようであった．[25]

モーリス・ゴールドハーバー，1958

スピンを持つ粒子には，コルクの栓抜きのような‘巻き方向’，つまり‘ヘリシティ’があてがわれる．もし，粒子が運動方向に対して時計回りに回転する場合は右ネジ，反時計回りの場合は左ネジと類似できる．

質量を持たない2成分ニュートリノ理論は，ニュートリノが左巻きか右巻きか，どちらか一方であることを教えてくれる．しかしこの理論はベータ崩壊に伴って生成されるニュートリノが，どちらの巻き方であるかは規定しな

い．これは実験によって決定されるべきものであり，その決定はブルックヘーブン国立研究所で行われた．

ヤンとリーは1956年の夏，ブルックヘーブンに滞在した．そこで，彼らのパリティに関するアイディアを実験物理学者，とりわけ経験豊富な原子核物理学者のモーリス・ゴールドハーバーと頻繁に議論を行った．ナチスが台頭して来た1933年に，彼はベルリンでの研究を中断してケンブリッジに渡った．そこで，キャベンディッシュ研究所にいたチャドウィックと一緒に研究を開始し，中性子が陽子よりも重くそのため不安定であることを最初に実証した．その後1938年にゴールドハーバーはアメリカへ行き，1950年にニューヨーク州ロングアイランドに新しくできたブルックヘーブン国立研究所に移った．

1957年秋に，ゴールドハーバーと彼の協力者であるリー・グロージンス，アンドリュー・サンヤーは，ニュートリノのヘリシティ（巻き方向）を測定する実験を始めた．この実験は巧妙な手法を用いるもので，今日においても物理学者から実験の金字塔と称賛されている．

実験の着想は，ベータ崩壊と密接に関係している電子捕獲反応を調べることであった．ある種の不安定な原子核は，近くの原子軌道を廻っている電子を捕獲する．この時，原子核の中の陽子が中性子に転換し，ニュートリノが放出される．この反応によって，原子核は陽子が一個少ない他の元素に変わる．ニュートリノはあるスピン軸を持って生成され，一方原子核はそれと反対向きのスピン軸を持ち反跳を受ける．運動量と角運動量の2つの保存則は，原子核とニュートリノが反対方向に走り出し，スピンの向きが反対になることを要求する．つまり，双方は同じヘリシティを持つことを意味する．そこでゴールドハーバー達は，反跳原子核のスピンの向きと運動方向が測定できれば，ニュートリノのヘリシティを求めることができると考えた．

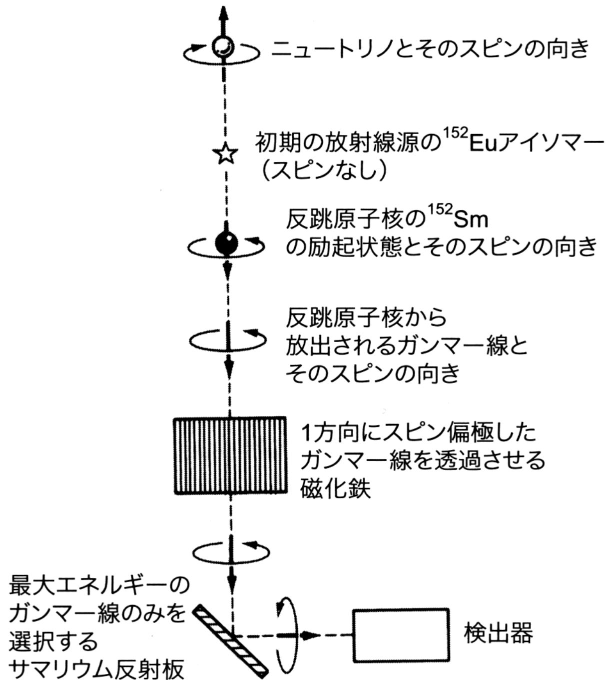
とはいえ，反跳原子核を測定する方法が問題である．その解決策として，電子捕獲後に大きなスピン状態に移行し，直ぐにガンマー線を放出して過剰な回転を緩和するような原子核を選んだ．実験者に要求される才能は，反跳原子核の運動方向とちょうど同じ方向に出てくるガンマー線を識別して，そのスピンつまり偏極を測定することである．これらのガンマー線は電子捕獲によって生成された原子核のヘリシティ，つまりニュートリノのヘリシティを示すはずである．

第一の課題は，この目的に適合した上記の連続現象を起こす原子核の選択である．彼らが探し出した唯一のこの目的に適する原子核はユーロピウム，正確にはユーロピウム 152m と呼ばれる希土類元素の放射性同位体であった．ここで m は，短時間安定な状態，‘メタ－ステーブル（準安定）’を意味し，152 は原子核内の 63 個の陽子と 89 個の中性子の合計数を示す．ユーロピウム 152m が電子を捕獲すると，サマリウム 152（62 個の陽子と 90 個の中性子から構成されている）に変わる．この反応で作られたサマリウム原子核は高いスピン状態にいるため，すぐにガンマー線を放出してサマリウムの安定な状態（基底状態）に移る．

ゴールドハーバー，グロージンス，サンヤーはブルックヘーブン研究所の原子炉で，炉から発生する中性子をユーロピウムの酸化物に照射して放射性ユーロピウムを作った．しかし，ユーロピウム 152m は 9.3 時間の半減期（試料中の原子核が崩壊して，その数が半分になるまでの時間）でサマリウム 152 に崩壊するため，大部分が崩壊して測定できなくなるまでの数時間のみ，使用可能であった．

実験者が直面する第二の課題は，回転状態にあるサマリウム原子核の走行方向と同方向に出てくるガンマー線だけを，確実に検出することであった．このことは，原子核の運動方向に変化を与えるエネルギー損失のないガンマー線の検出を意味する．これを実現するために，彼らはサマリウム酸化物でできている反射板を用いた．反射板のサマリウム 152 の原子核は，回転状態を励起するのに必要な，ちょうどそのエネルギーを持っているガンマー線のみを吸収する．そのあと，原子核はただちにガンマー線を放出して，回転のない基底状態に戻る．このため，ガンマー線の反射板のような役目をする．サマリウム原子核と異なる方向に出てくるガンマー線のように，エネルギー損失を伴ったガンマー線はサマリウム反射板をただ素通りするだけである．

実験における第三の重要課題は，サマリウム原子核から出てくるガンマー線のスピンを測定する方法であるが，このことは比較的容易であった．彼らはガンマー線を磁化した鉄の中に通した．ガンマー線が磁化鉄の中を透過する量は，磁化の向きに対するガンマー線のスピンの向きに依存する．そこで，磁化の向きを反転させて，多くのガンマー線が透過する方向を調べ，ガンマー線の偏極，すなわち‘巻き方向’を検出した．



ニュートリノのヘリシティを検出する極めて巧みな実験によって，ゴールドハーバー，グロージンズ，サンヤーは，ニュートリノの放出後に反跳原子核から出てくるガンマー線のヘリシティを測定した．原子核は原子軌道にいる電子を捕獲することによってニュートリノを放出すると同時に，新しい原子核に転換する．そしてこの原子核とニュートリノは，運動量保存則によりと正反対方向に走る．

ゴールドハーバー，グロージンス，サンヤーは9回，試料を変えて実験を繰り返した．それぞれで，細部で他と一致しないことがあったとはいえ，ガンマー線から得られた結果は十分に明白であった．ガンマー線は左巻きであった．すなわち，ニュートリノは左巻きである．

ニュートリノの質量

ニュートリノが有限の質量を持つことが発見されれば，それは素粒子標準理論を超える新しい理論の構築に一光を投じるであろう；このようにニュートリノの質量を決める実験は，実験家が挑む重要課題の一つである.[26]

ジャーン・ルック・ヴィラミー，1986

理論物理学者であり，作家としても天賦の才を持つジェラミー・バーンシュタインは，1956 年から 57 年の間の出来事を‘華々しい革命’と評した．激動はヤンとリーによる，弱い力が左右対称性を保証しないという提言から始まった．そして質量を持たない左巻きニュートリノ（と右巻き反ニュートリノ）を含む新理論が作られた．この理論では，ベータ崩壊で生成されるニュートリノの質量は 0 である．しかし，この実験的証拠があるのだろうか？ 確かにニュートリノの質量は非常に小さいようであるが，ゼロと言いきれるのか？

パウリが 1930 年に仮説としてニュートリノの存在を初めて提案した時から，ベータ崩壊で出てくる電子が時折，原子核の壊変によって解放されるエネルギーの大部分を持ち去ることから，ニュートリノの質量がそんなに大きくないことはすでに明らかであった．パウリの有名な放射能紳士・淑女に宛てた手紙の中で，ニュートリノ（中性粒子または中性子と呼んでいた）の考えを紹介しながら彼は次のように述べている：

中性粒子の質量は電子の質量と同程度の大きさであるべきで，いずれにせよ，陽子の質量の 0.01 以上ではない.[27]

3 年後にフランシス・ペリンはさらに一歩進めた．彼は実験データとの比較から，ニュートリノの固有の質量が 0 であるべきとの結論を出した．それからはフェルミの出番である．彼は歴史に残る論文“ベータ崩壊理論の試み”の中の第 7 章を‘ニュートリノの質量’にあてた．この中でフェルミは次のように述べている：

ベータ線の連続エネルギー分布の形は，遷移確率によって決まる．最初にこの形がニュートリノの静止質量（μ）にどのように依存するかを議論しよう．このことは，実験で得られた分布曲線との比較によって定数 μ を決定するためである．… 依存度は … 分布曲線の終端近傍でもっとも顕著になる．… 図 1（p. 40 の図参照）では，分布曲線の終端部分を $\mu = 0$，$\mu =$ 小，$\mu =$ 大 に対して示してある．実験結果にもっとも

近い曲線は，$\mu = 0$ の場合であることがわかる．よって我々はニュートリノがゼロか，もしくは電子の質量よりも十分小さいという結論に到達する．[28]

彼はペリンも同じ結論を得たと付け加えた．

長い歳月をかけて，実験の精度はどんどん向上し，ベータ線エネルギー分布の終端の形が調べられた．その結果，ニュートリノの質量の上限値は電子の質量の極々一部にすぎない位まで急激に下げられた．しかし，実験は常に質量に対する最大許容値のみを与えた．つまり，けっして下限値をもたらすことはなく，そのため，ニュートリノが質量を持つのかどうかという疑問を解決することができなかった．

その後 1980 年に，一大関心事のニュースがモスクワの理論・実験物理学研究所（ITEP）から漏れ始めた．うわさによるとそこの実験チームが，非常に小さいけれども 0 でないニュートリノ質量の測定に成功したというものであった．機は熟していた．世の理論物理学者達は，待ってましたとばかりにこの発見を歓迎した．

この数年間は電磁弱理論，すなわち自然界に存在する基本的な力のうち，電磁気力と弱い力の 2 力の相互作用を統一的に記述する理論，の着実な発展が刻まれた．フェルミのベータ崩壊の理論以来，もっとも重要な理論的研究の進展の一つは，サラムとシェルダン・グラショウ，スティーブン・ワインバーグがそれぞれ独立に，全ての素粒子が引起す弱い相互作用と電磁相互作用を自己矛盾のない美しい描像に統合したことであった．そして，1980 年までに実験は，幾度もこの理論の有用性を確認した．

この大きな研究上の躍進に引続き，理論家にとって次に進むべき展開は，電磁気力と弱い力の統一像と同じ数学的枠組みの中に，強い力をも取り込んだより広い枠組みの大統一理論を構築することであった．ここでニュートリノの質量が関与することになる．電磁弱相互作用はニュートリノに対して，質量を持たず 2 成分理論に従う左巻き粒子であること以上に何も規定しない．しかし，大統一理論はより包括的で，ある理論は小さな質量を持つニュートリノを必要とする．ニュートリノが質量を持つかどうかは，電磁弱理論か正しいか，または新しい大統一理論かを判定する試金石として，極めて重大な役目を担うことになった．

このような状況の中で，1980 年春にモスクワから届いたニュースは，大いに興奮させるものであった．ヴァレンティン・ルビモフと共同研究者達は，ニュートリノ質量が（14 － 46）電子ボルトの間にあることを検出したと主張した．この質量は電子の質量の 511 キロ電子ボルトよりもずっと小さいが，しかしながら 0 ではない．突如として世界中の理論家の間で研究旋風が巻き起こった．彼らはこの実験結果が，大統一理論のみならず宇宙論や天体物理に与える影響を検討した．ニュートリノがこのような小さな質量を持っていても，宇宙スケールでの物質の釣り合いが劇的に変化する（第 7 章参照）．しかし結局のところ，これらの全ての議論は，いつしかこの実験結果が間違いとわかり，消え去るのではないかという一つの疑念によって，暗雲に覆われた．モスクワの実験は正しいのか？

ニュートリノの質量を測る

精密実験で得られた重大な結果が広く受入れられるには，少なくとも，もう一つの別の実験によって確認されなければならない．[29]

ジャーン・ルック・ヴィラミー，1986

ニュートリノの質量を量ることは極めて難しい実験であり，ほとんどどの場合，その努力は報われない．もしニュートリノの質量が完全にゼロなら，実験的に証明することは不可能である．最大限できることは，質量がある値以下であると言えることであり，多くの科学者を魅了するような，何年にもおよぶ重労働の報酬に値しない．とはいえ，質量を検出するあらゆる努力は，ニュートリノを理解する上で重要である．ニュートリノが有限質量を持つようだとルビモフのチームが発表したからには，ほかの研究者が彼らの結果を再確認することは必然であった．

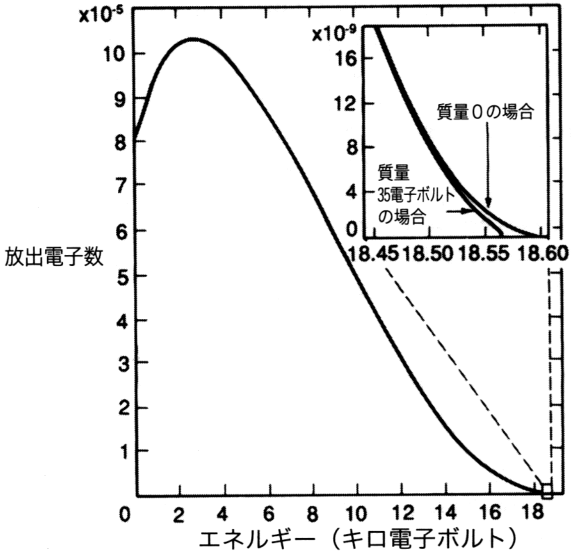
ニュートリノの質量を測るもっとも直接的な方法は，ペリンやフェルミに従い，ベータ崩壊によって放出される電子のエネルギー分布，特に電子のエネルギーが最大エネルギーとなる分布の先端に近い部分を精密に調べることである．フェルミが指摘したように，先端部の正確な形は放出される電子の数がゼロに近づくにつれて，ニュートリノの質量に決定的に依存する．しか

し，この分布を測定しようとする実験者は，とてつもない難しさに直面する．

その第一は，エネルギーが最大に近づくにつれて電子の数が激減する一方，実験装置にはそれより低いエネルギーの邪魔な電子が大量に入ってくる．その結果，先端部の電子の計数率は全計数率の十億分の一程度である．第二の困難は，先端部のエネルギーがニュートリノ質量を決定する鍵を握っているので，電子のエネルギーを高精度で測定しなければならないことである．このことは，ある特定のエネルギーを持った電子が実験装置内に入った時に，何が起るかを正確に把握しなければならないことを意味する．三番目は，電子を放出するベータ線源は，電子が線源物質中を抜け出る間にエネルギーを失うため，できる限り薄くしなければならない．しかしその一方で，電子数の少ないエネルギー分布の先端部の測定を可能にする穴埋めとして，線源物質はできるだけ高計数率を与えるものでなければならない．さらに，ベータ崩壊する原子核を含む原子や分子の性質を理解する必要がある．すなわち，ベータ線のエネルギーは原子内の電子をいろんなエネルギー状態に励起する時に失われるので，これらの励起に対応してそれぞれ異なった最大エネルギーを持つ分布が足し合わされることになる．

他に考慮すべきことは，使用するベータ線源の選択である．エネルギー先端部の電子数は，最大エネルギーが小さくなるほど一般的に多くなる．そこでニュートリノの質量を検出しようとする多くの実験者は，1個の陽子が2個の中性子を伴う原子核，いわば重い水素と言うべきトリチウムの崩壊を調べた．トリチウムは12.3年の半減期でベータ崩壊する．ニュートリノの質量を測るという点からもっとも魅力的なことは，ベータ線の最大エネルギーが18.6 keVと極めて小さいことである．

ニュートリノの質量を検出する実験の主役は，ベータ崩壊で出てくる電子のエネルギーを測定するエネルギー分析器である．簡単な磁気分析器内はちょうどプリズムが白色光線を分解・分散するように，磁場は電子のエネルギーによって電子軌道を振り分ける（第2章参照）．小さな軌道口径を持つ磁気分析器は，狭いエネルギー範囲の電子のみが検出器に到達することを許す．検出器は磁場によって同じエネルギーの電子が一点に収束する焦点面に置かれる．ここで，エネルギーを高精度で測ろうとすると，電子強度を犠牲にせざるを得ないという潜在的な問題が起る．つまり電子の最初の空間的広がりを



トリチウムのベータ崩壊によって生成される電子のエネルギー分布の予想図．挿入図は，ニュートリノが小さな質量を持つ場合に期待される微細な効果を見るために，高いエネルギーの先端部を 2,500 倍に拡大した分布．(提供：クンディッヒ，チューリッヒ大学)

押さえるために，口径を狭め，さらに小さなサイズのベータ線源を使用して測定するからである．

1960 年代にストックホルム大学のカール－エリク・ベルギストは，これまでより遥かに高い強度が出せる高性能の分析器を開発した．彼は特に，点線源に代わって大面積の線源が使えるように電場を取入れて分析器の設計を行った．彼が駆使した技術とは，線源全体に不均一の電場を印加することであった．この電場によって，線源上の異なる場所から出てくる同じエネルギーの粒子が全て磁場によって同一の場所に収斂されるように，電子のエネルギーは変更を受ける．長方形の線源は，検出器が並んでいる分析器の焦点面上に細い帯状の線として投影される．

以前の測定結果は，ニュートリノの質量が（400–500）電子ボルト以下であることを示していた．ベルギストは非常に注意深く測定を行うことによっ

て，質量の上限値を一桁改善することに成功した．1972年に彼は，“ニュートリノ質量＜60電子ボルト”という実験結果を発表した．これは驚異的な偉業であった．

その後，1975年にモスクワ理論・実験物理学研究所（ITEP）のトレチャコフは，電子を分散させた後に再び収束させることを連続4回繰り返し，電子が収束点の口径部を通過するたびに軌道に混入するエネルギーの異なる電子を削ぎ落とす，さらに精巧な分析器を考案した．この設計の素晴らしい点は，ベータ線源と電子検出器の間隔が比較的大きく，2mくらいあいていることである．このことは，検出器にとって招かざる客であるバックグランドを減少させることに一役買っている．そして，ベータ線エネルギー分布の先端付近の数少ない電子を計測する時に，重要な役割を果す．

1980年3月，ITEPにおける5年間の研究が実を結びルビモフとトレッチャコフおよびその共同研究者達は，ニュートリノの質量が（14–46）電子ボルトであることを示唆する実験結果を出し，それを発表する準備をしていた．世界の物理学者達はこの結果に驚きと当惑を示し，議論を巻き起こした．彼らの実験技術，またはデータ解析の手法の面で何か重大な欠陥はないのか？とにかく，ニュートリノの質量が及ぼす影響があまりにも重大なために，彼らの実験結果はすんなりと受け入れられなかった．一つ以上の異なる実験によって再確認されること，または否定されることが必要であった．

チューリッヒ大学のボルター・クンディッヒと共同研究者達は，初めてモスクワの結果と矛盾する新しい実験事実を発表した．このチームはトレッチャコフが考案した方式と同様の分析器を作った．特に，この装置は線源から出てくる電子を電場によって減速させるため，電子のエネルギーは初期の値の10%ほどに減る．このことは同じ強さの磁場を用いても分析器は大きなエネルギー分解能を持つことになり，狭いエネルギー範囲の電子を狙い撃ちして精密に調べることができる．このチームは分析器で選択される中心エネルギーを変えるために，磁場ではなく減速電場の強さを変更した．この方法は，装置の大部分を安定に維持する点で好都合であった．

チューリッヒとモスクワの実験方法でもう一つ異なる点は，ベータ線源である．クンディッヒ達はトリチウムを炭素の中に埋め込み，それをアルミニウム箔上に蒸着したものを用いた．できるだけ大きな線源を作るために，彼

らは10枚の円板状の線源を数cmの長さに束ねた.

1986年5月, クンディッヒのチームは発表の準備ができあがった：

“実験から得られたニュートリノの質量はゼロに等しく, その上限値は18電子ボルトである.”[30]

そして論文は, 次のように締めくくっている：

“結論として我々は有限質量を示唆する証拠を見出せなかった. …このことはモスクワの結果と著しく矛盾する. 我々には, この食い違いを十分説明してくれる実験上の誤差の源が見当たらない.[31]

一方モスクワのチームは実験装置の性能向上に向けて, 彼らもまた磁場を一定に保ち, 異なったエネルギーの電子を弁別するために電場を用いる装置の改造に忙しかった. そして1986年11月, 新しい結果をフィジカル・レヴュー・レター誌に投稿した.

今回の結果と, 以前の実験で得られた結果をまとめると, ニュートリノの質量は30.3 [+2, −8] 電子ボルトとなる.[32]

モスクワとチューリッヒの結果の食い違いは, 依然として残った.

しかし, モスクワからの論文が到着する5日前に, もう一つの論文がフィジカル・レヴュー・レター誌の編集部に届いた. この論文はモスクワと同じ型のエネルギー分析器を用いる3番目の実験結果で, ヘミッシュ・ロバートソンとトム・ボウルスが率いるロスアラモス国立研究所（ニューメキシコ州）チームの報告であった. 彼らの実験の主な特徴は, トリチウム・ガスのベータ線源を使用したことであった. この点について彼らは次のように述べている：

トリチウム分子の終状態効果は正確に知ることができる. このため, データは本質的に理論に依存しないニュートリノ質量の上限値, 27電子ボルト（95%の統計的信頼度）を与える.[33]

トリチウム分子は, それぞれが1個の電子を伴う2つの原子からなる比較的簡単な系である. 普通の性能の計算機を使えば, トリチウム原子核の一つがベータ崩壊を起こした時に, 分子がどのエネルギー状態に遷移するかを厳密に計算することができる. その上, ベータ崩壊による電子が線源物質の中を通り抜ける際に, どれだけのエネルギーを失うかということを推定する問

題は，固体よりもずっと希薄なガスではそれほど難しくない．ボウルズとロバートソン，それに共同研究者達がこのために受ける代償は，小さい密度ゆえにベータ崩壊の頻度が少なく，十分な量のデータを取得するのに長い時間を要することであった．

この時点では，ロスアラモスの結果はモスクワとチューリッヒの結果の違いを完全に解決できなかった．例えば，モスクワとロスアラモス双方の結果は，ニュートリノの質量として27電子ボルトよりも少し小さい値が許容される，という主張は可能である．しかし，これは明らかにチューリッヒの結果と矛盾する．この問題を解決するには，もっと多くの実験データが要求された．そして，この時期になると世界中で数チームが，エネルギー分析器の設計に特色を持たせ，また種々のトリチウム線源を駆使して，ニュートリノの質量測定に挑戦する実験を開始していた．これらの実験の主眼は，10電子ボルト以下のニュートリノの質量を測定できる装置を開発することに置かれた．質量がこの値以下でなければならないという明らかな証拠が得られれば，ニュートリノが質量を持つかどうかという疑問を解決できないにしても，ルビモフ・チームの主張を葬ることになる．

1990年の夏までに，ルビモフ達の結果に重くのしかかるような証拠が出始めた．6月にジュネーブで開催されたニュートリノ’90国際会議で，チューリッヒとロスアラモスのチームは共に新しい結果を発表した．チューリッヒの研究者達は新しい線源（わずか分子サイズの厚さの滑らかな表面を持つトリチウムを添加した炭化水素層）を用いて実験を行ってきた．新しいデータから，95%の信頼度でニュートリノの質量に対する上限値は15.4電子ボルトに下がった．一方，ロスアラモス・チームはさらに小さい9.4電子ボルトの上限値を与えた．

時を同じくして，これらの新しい結果を支持するさらなる証拠が日本で蓄積されていた．東京大学原子核研究所を中心とする研究チームは，ニュートリノの質量を測定する先駆的実験で使われたベルギスト型エネルギー分析器を作った．日本グループの大きな特徴は，トリチウムのベータ崩壊電子のエネルギー先端部を測定する時と，既知のエネルギーの電子を用いて分析器の応答を調べる時と，線源として同一の物質を使用するところにある．彼らはカドミウム塩基結合を持つアラキジン酸を用い，トリチウム線源用には酸の

中の数個の水素をトリチウムと置換し，一方，応答測定用にはカドミウムを放射性カドミウムと置換する方法を駆使した．また製作した線源は驚くほど薄く，分子 2 個分の層からできていた．

1991 年 2 月，フィジックス・レター B の論文誌に川上宏金他の最新の結果が発表された．彼らは 15 万事象を注意深く解析した結果，ニュートリノの質量が 95%の信頼度で 13 電子ボルト以下であるという結論に至った．

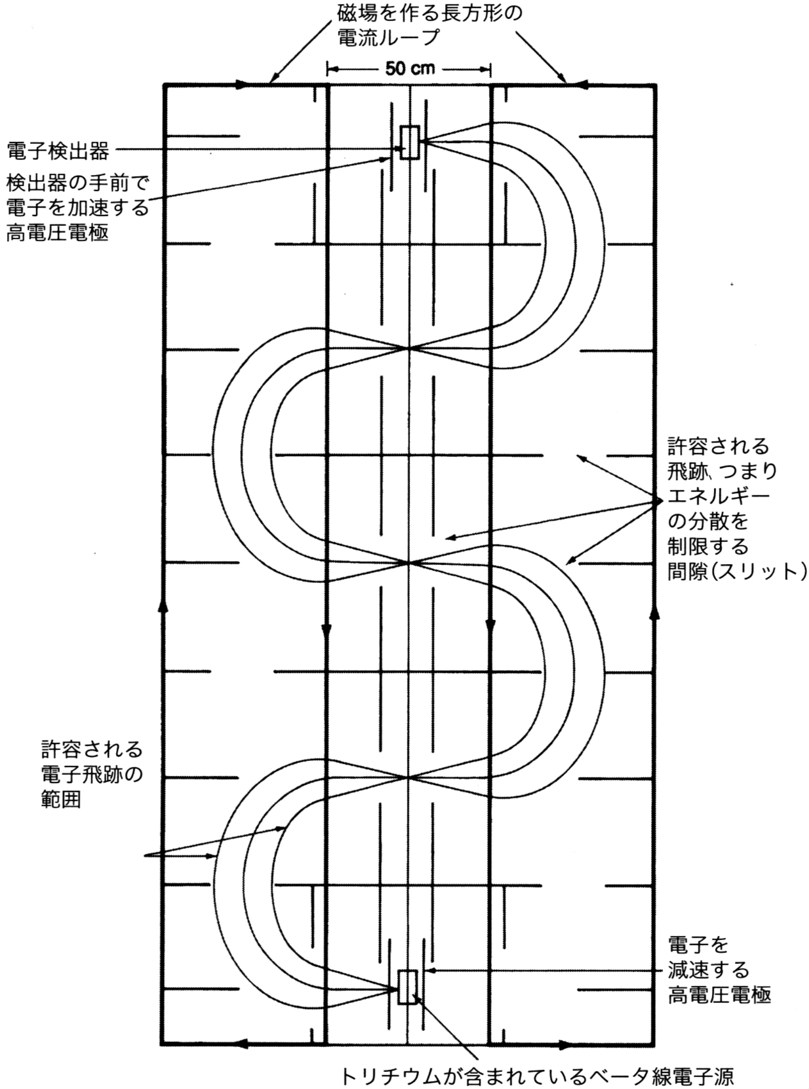
ロスアラモス，東京，チューリッヒの結果はどれも，1987 年にルビモフのグループが発表した下限値：22 電子ボルトを大きく下回っている．そして，多くの物理学者は，ルビモフ達の結果が間違っていると結論するようになった．先駆者ベルギストをはじめとする幾人かの専門家は，モスクワ・チームが使用していたデータ解析方法の手順に疑問があることを指摘した．ニュートリノの質量が 15 電子ボルト以下であることは，今や確かになった．ただし残された問題は，質量がどのくらい小さいかである．

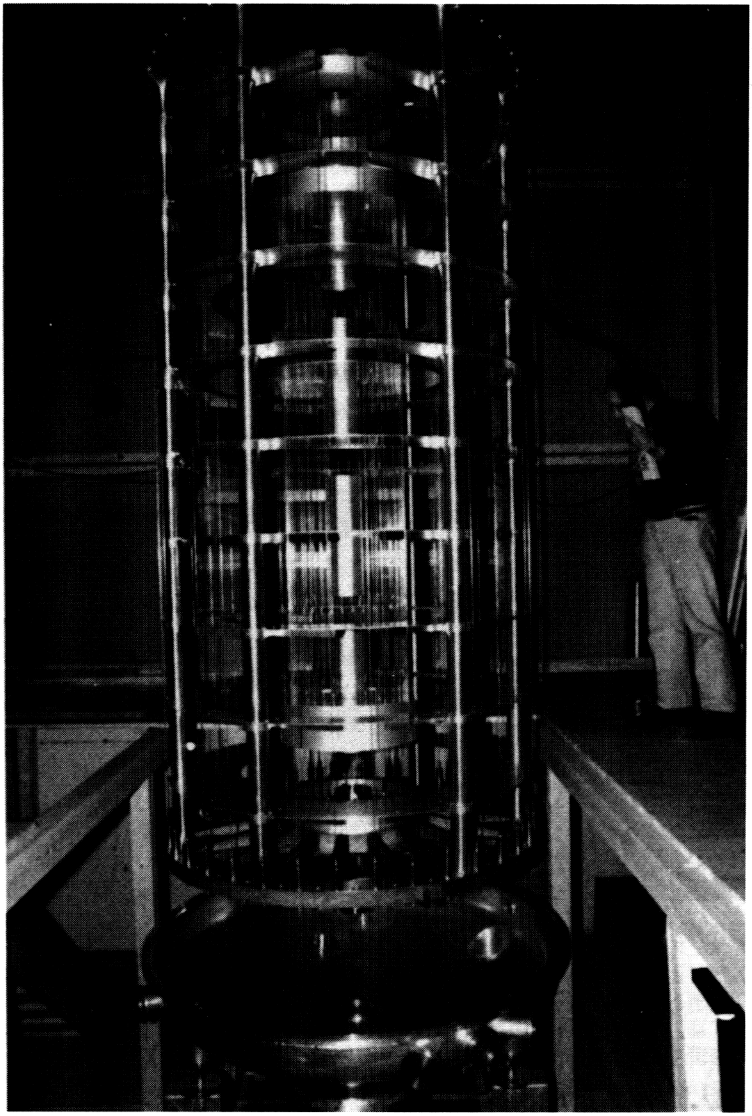
次世代の実験は，数電子ボルトまで上限値を下げることが必須である[注 1]．しかしながら残念なことに，このレベルのニュートリノ質量に対してトリチウムのベータ崩壊を調べることは，ほとんど無駄な努力になる．それはエネルギー分布に与える質量の効果が極度に小さくなるためである．例えば 10 電子ボルトの質量の上限値を得るのに 2 年間を費やす実験では，1 電子ボルトに到達するのに 2 百万年かかるだろう．ここで，別の種類の実験がニュートリノを検出しない逆説的な手法に基づき，“ニュートリノの質量”や“ニュートリノとはどのタイプのニュートリノか”という人を惑わすような禅問答に解決の糸口を与える．

ニュートリノはどのタイプ

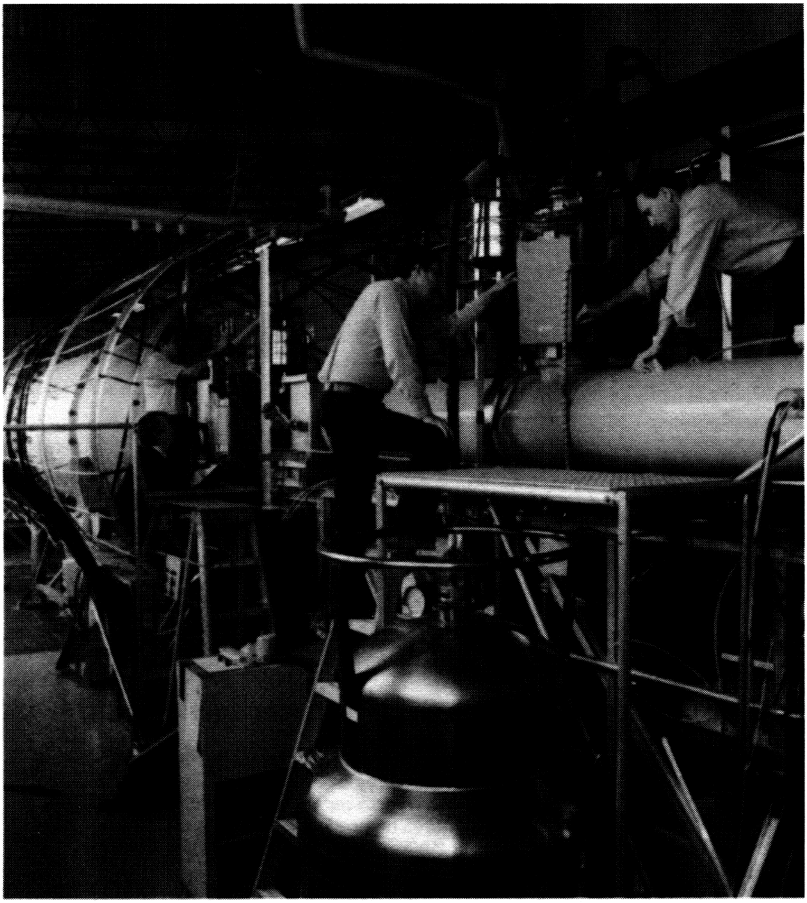
マヨラナ型ニュートリノは理路整然として興味深い研究対象ではあるが，自然界に実在しないのではないかという説が，50 年代後半と 60 年代にかけてしばしば議論された．それ以来，マヨラナによって提起された疑問はますます重要性を増し，こんにち

注 1　現時点でもトリチウムを用いたニュートリノの質量測定は続行されている．実験精度が向上し，95%の信頼度で 2.2eV の上限値が得られている．今後 0.2eV までの検出能力を持つプロジェクトが提案されている．


磁場を作る長方形の
電流ループ
50 cm
電子検出器
検出器の手前で
電子を加速する
高電圧電極
許容される
飛跡､つまり
エネルギー
の分散を
制限する
間隙(スリット)
許容される
電子飛跡の
範囲
電子を
減速する
高電圧電極
トリチウムが含まれているベータ線電子源



トリチウムのベータ崩壊で放出されるニュートリノの質量測定に使用された，チューリッヒ大学チームのエネルギー分析器．前ページの模式図は分析器の円筒形構造の断面図を示す．この図からトレチャコフによる設計は，一組の分析器が数組，近接して連結されている様子がわかる．電子は交互に向きが変わる磁場の中を走行しながら，4回分散・収束を繰り返し，最後にトリチウム源から2.65m離れた所にある検出器に到達する．(提供：チューリッヒ大学)



ロスアラモス国立研究所のボウルス（中央）と共同研究者達は，トリチウムのベータ崩壊によって生じる電子のエネルギー分布の測定装置を点検している．電子は最前部の長い超伝導磁石の中を通り抜けた後に，後方のエネルギー分析器に入る．エネルギー分析器には，地球磁場を相殺するためのかご状のコイルが巻かれている．(提供：ロスアラモス国立研究所)

のニュートリノ物理学の中心課題になっている.[34]

ブルーノ・ポンテコルボ，1982

トリチウムのベータ崩壊によって放出される荷電粒子は電子である．そし

て習慣上，同時に出てくる中性粒子を反ニュートリノと呼んでいる．ここでいう習慣とは，軽粒子数保存則として知られている法則に基づいている．電子やニュートリノは軽粒子と名付けられ，原子核内で作用する強い力を感じない粒子族の一員である．経験則である軽粒子数保存則は，どんな粒子反応においても全軽粒子数と全反軽粒子数の差を一定に保つ．トリチウムの崩壊前では，唯一の軽粒子は原子核のまわりを廻る電子である．しかし，崩壊後は新たに軽粒子として電子が生成される．それゆえ，帳尻合わせのために他に生成される粒子は反軽粒子，つまりこの場合，反ニュートリノでなければならない．

電子と反電子（陽電子）は反対符号の電荷を持ち，明らかに異なる粒子である．しかしながら，同じような識別が電気的に中性の粒子に適用できるかどうかは自明でない．中性子には異なる反粒子，反中性子の存在が確認されている．しかし，現在我々が知っているように中性子は真の素粒子ではなく，電荷を持ったクォークの複合粒子である．では，ニュートリノはどうなのか？

この疑問は，頭はおそろしく切れるが常識離れな人柄のローマ大学のフェルミの同僚，エトーレ・マヨラナによって1937年に提起された．1931年にフェルミの学生になったポンテコルボは，フェルミのマヨラナに対する称賛を思い出し，次のように言ったことを引き合いに出した．

物理学上の難題が持ち上がると，世の中でマヨラナより巧みにかつ迅速にそれを解決できる人は誰一人ない.[35]

1906年に生まれたマヨラナは25才になるまでに，鋭い洞察力の持ち主であることで知れ渡った．しかし，ポンテコルボによれば，彼は生涯不幸に付きまとわれた悲観論者であった．1934年頃から彼はいっそう厭世的になり，おそらく自殺を図ったのだろう，1938年にこの世を去った．マヨラナは自分の多くの研究を論文にすることを面倒くさがったが，死去の前に大学教授の職を競うことを決意し，分を良くしようと論文を書いた．50年後にこの論文は，ポンテコルボが言うように“ニュートリノ物理学の中心課題”として著名な論文になった．それは，“ニュートリノがそれ自身の反粒子と同一かどうか？”という問題である．

この論文の結論でマヨラナは次のように書いている：

新しい量子化の手法を用いて，電子と陽電子に対する完全対称形の量子論を求めることによって，この可能性は明らかになる．このことはディラック方程式の解釈を，新しい種類の粒子，特に中性粒子に対して反粒子の存在を仮定するという理由から，幾分修正を必要とする.[36]

マヨラナの論文の本質は，彼の新しい定式化が中性粒子の記述を簡素化する一方で，いかにして電子と陽電子の関係を損なわないようにするかを示すことであった．ディラック理論は粒子と反粒子がそれぞれ右巻き，または左巻きの4つの可能な状態を与えるが，マヨラナ理論は粒子と反粒子が右巻き，または左巻きのどちらかの2つの状態を与える.（すぐ後にジュリオ・ラッカーが指摘したように，マヨラナによるディラック理論の対称化はマヨラナ自身が最初に考えていたことであるが，電子や陽電子に対してではなく，ニュートリノにだけ適用されるものであった.）

マヨラナは論文の中で，現時点ではどちらの理論に従うかを実験によって判定することは，おそらく不可能であろうと述べた.[37] しかし，ポンテコルボが言うには，ニュートリノを検出しようという考えは，当時，まともな議論の対照ではなかった．ニュートリノを大量に放出する原子炉の開発によって，このようなテストが実現可能になった.

1946年，オンタリオ州（カナダ）のチョーク・リヴァー研究所で研究していたポンテコルボにとって，強力な原子炉の出現によって自由なニュートリノを検出することがようやく意味ある議論になる時代が訪れた.[38] 彼は放射性原子核をつくる逆ベータ崩壊反応を検出することが，最良の実験方法であると考えた．この方法では，ニュートリノ反応の数は誘起された放射性崩壊を計測することによって求められる．そして，彼はこの目的にかなったもっとも好都合な反応として，塩素がニュートリノを吸収して電子を放出すると同時に，アルゴンの放射性状態に転換する反応を指摘した.

今，軽粒子数保存を考慮すると，この反応はニュートリノによって引起され，基本的には一個の軽粒子（ニュートリノ）が他の軽粒子（電子）に転換する．同じ便法から，原子炉はベータ崩壊によって電子を生成するとともに，反ニュートリノを放出する．しかし，1946年当時は，ニュートリノと反ニュートリノが異質なものであるかどうかを確かめることは難しかった．ポンテコルボは彼の考えをパウリに話した.



1932 年ユーゴスラビア（当時）のアバジアで娘達と一緒のエトーレ・マヨラナ. 彼はニュートリノと反ニュートリノが区別できない可能性を指摘した.（提供：AIP ニールス・ボーア図書館, エラスモ・レカミ寄贈）

パウリはポンテコルボの提案に大いに興味を示した. そして, 原子炉ニュートリノが塩素と反応を起こすのに有効であるかどうか明らかでないことを指摘したが, 多分大丈夫だろうと考えた.[39]

1949 年にカリフォルニアにあるローレンス・バークレイ研究所のルイ・アルバレは, ポンテコルボとは独立にこの反応を詳細に検討した. しかし, 結局のところポンテコルボもアルバレもこのアイディアを実行するに至らなかった. 代わりに, ブッルックヘーブン国立研究所の化学者がこの話に飛びついた.

1955 年レイモンド・デービスはライネスの勧めで, ドライ・クリーニングの洗剤であるテトラ・クロロエチレン 4 トンを満たした検出器を, サバンナ・リバーにある原子炉の周辺に設置した. ここでライネスは, ニュートリノの発見で歴史に残る実験をしていた. 第 6 章で, いかにしてデービスが後にこの実験で必要とされた難しい技術を, 太陽からやってくるニュートリノの検出に集大成したかについて, 詳しく述べる. しかしながら, 1955 年に話を戻すと, 彼は原子炉からやってくる反ニュートリノが, 塩素検出器の中で吸収された証拠を確認することができなかった. つまり, ベータ崩壊の際に電子

とともに放出される粒子は，その逆反応過程で電子の放出を引き起すことができないかのようであった．ニュートリノと反ニュートリノは，マヨラナ理論よりはディラック理論と合致していて，異なる粒子として振舞った．

しかし，パリティ非保存の発見は，デービスの実験結果を解釈するもう一つの可能性を提供した．つまり，ベータ崩壊で放出される中性粒子は右巻きであり，一方，塩素の逆ベータ崩壊過程に必要な中性粒子は，ニュートリノと反ニュートリノが同一粒子であるかどうかにかかわらず，左巻きでなければならない．塩素実験は，粒子が右巻きか左巻きかを区別できるのみで，ディラック・ニュートリノとマヨラナ・ニュートリノとの違いについては何も言うことができない．

マヨラナ・ニュートリノに対する関心は，1957年以降，2成分ニュートリノ理論の成功とともに衰退した．しかし，1970年代後半に提起された素粒子大統一理論とともに，理論物理学者達は微小な質量を持つマヨラナ・ニュートリノの存在を示唆し，マヨラナの古いアイディアを復権させた．ニュートリノのこのような根本的な性質を反映する実験的証拠を検出する望みはあるだろうか？

もし，ニュートリノが質量を持たなければ，我々は何も言及できない．ここでは，マヨラナ理論とディラック理論は常に同じ結果を与える．しかし，もし，ニュートリノが微小ながらも質量を持ち，マヨラナが提案したようにそれ自身が反ニュートリノであるなら，ニュートリノがマヨラナ型かディラック型かを判定する一つの実験方法が考えられる．それは，ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊を検出することである．

仮想ニュートリノ

誰もが，ディラック・ニュートリノとマヨラナ・ニュートリノの違いを，実験的に調べることは無理のようだと思っている．今日まで我々はまだどちらのタイプのニュートリノが実在するのか知らない．[40]

ジェラミ・バーンスタイン，1984

ひと昔前の1935年に，ボルチモアのジョンホプキンス大学で研究してい



この写真の中でフェルミと一緒にいるゲッパート－マイヤーは，1935 年に二重ベータ崩壊の可能性を検討し，この崩壊がめったに引起されないと結論した．(提供：AIP ニールス・ボーア図書館)

たマリア・ゲッパート－マイヤーは，2 つの中性子がほぼ同時に陽子に転換する特殊なベータ崩壊の可能性について調べた．この“二重ベータ崩壊”は，陽子と中性子がともに偶数個の原子核の中でのみ起る．これら“偶－偶”核のうちのあるものは，ベータ崩壊後の原子核が崩壊前の原子核よりも軽いどころか，逆に重いために，通常のベータ崩壊による崩懐が禁止される．(原子核全体の重さは，その中に含まれている粒子数だけでなく，より複雑なメカニズムに基づく粒子間に働く力の釣り合いに依存する.) これらの“偶－偶”核は 2 個の中性子を陽子に転換させることによって，軽い状態になれる．すなわち，二重ベータ崩壊が許されることになる．この崩壊過程は，2 個の電子と 2 個の反ニュートリノを放出する．しかしながら，ゲッパート－マイヤーの計算によれば，二重ベータ崩懐は弱い力が 2 回働くために頻度が稀で，全崩壊確率は普通のベータ崩壊に比べてずっと小さい．

ゲッパート－マイヤーの研究の 4 年後に，米国のもう一人の理論家，ウェンデル・フーリーは，もしニュートリノがマヨラナ粒子ならば，二重ベータ崩壊の別の崩懐様式が可能であることを示した．フーリーの考えによれば，もしニュートリノがそれ自身，反ニュートリノであるなら，一方の中性子の

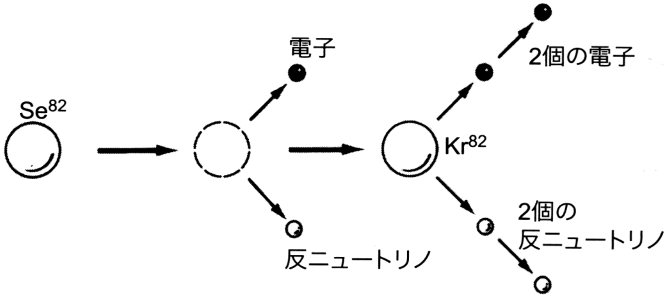
ベータ崩壊から放出されたニュートリノは，逆ベータ崩壊反応によって他方の中性子に再吸収される，その結果，全体としてニュートリノの放出を伴うことなく，2個の陽子と2個の電子が生成される．つまり，ニュートリノは測定できない量子力学的状態においてのみ反応に関与することから，仮想的役割を演じることになる．さらに重要なことは，ニュートリノが実際の粒子として現れる必要がないため，この崩壊は最初に提案された二重ベータ崩壊よりももっと頻繁に起るべきであると，フーリーは指摘した．

しかしながら，パリティ非保存の発見はデービスの実験結果に対すると同様に，フーリーの主張にとっても逆風になった．もし，中性子によって放出された粒子が右巻きなら，その時もう一方の中性子によって吸収されることは起こりえないだろう．すなわち，二重ベータ崩壊は決して起らないことになる．

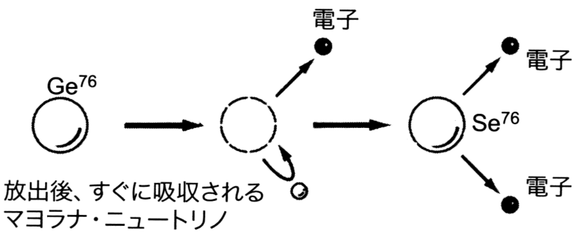
あるいは，起るとすればどんな場合か？ ニュートリノが左と右の巻き方を，何らかの方法で変えることができるとしたらどうだろう？ このことは，ニュートリノがわずかでも質量を持っていれば可能であることが示される．量子論によれば，ニュートリノが質量を持つなら，左右の巻き成分が混合した状態として存在しなければならない．このことは次のように考えると理解できる：質量を持つニュートリノは光の速さで走行できない．そのため原理的には，あなたはニュートリノを追い越すことができる．この時，あなたはもともと左巻きのニュートリノを振り返って見るなら，ニュートリノの運動方向が逆転するため右巻きのニュートリノになっているのがわかる．

この新しい描像によれば，中性子から放出されたニュートリノが僅かとはいえ他の中性子によって再吸収される機会を持つことになり，ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊が起きる．さらに興味深い点は，この崩壊頻度がニュートリノの質量に依存していることである．つまり，ニュートリノの質量が大きいほど二重ベータ崩壊を起こしやすい．

これまでの議論は，“もし”とか“しかし”などが混在しているように見えるが，導かれる結論は，稀な崩壊過程であるニュートリノの出てこない二重ベータ崩壊を探索する実験に十分な価値を与えるもので，非常に重要である．もし，実験によってこの崩壊が発見されれば，ニュートリノがそれ自身の反粒子と区別できない，つまりマヨラナ粒子であることと，ニュートリノの質



(a) 2ニュートリノ放出二重ベータ崩壊

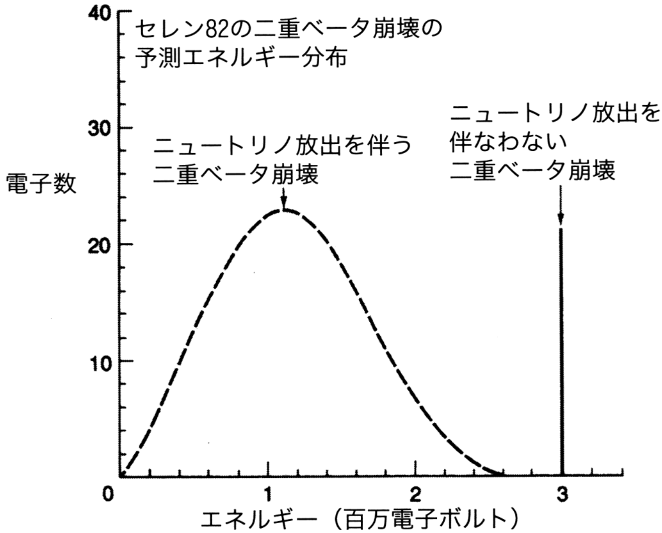


(b) ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊

(a)　二重ベータ崩壊では，偶数個の陽子と中性子を持つ原子核が重い中間状態を経由して，すばやく 2 回連続してベータ崩壊を起こす．この結果，2 個の電子と 2 個の反ニュートリノを放出する．例えば，セレン 82 はクリプトン 82 に崩壊する．(b) マヨラナが提案したように，もし，ニュートリノと反ニュートリノの区別ができないなら，最初のベータ崩壊で生成されたニュートリノは，次の反応過程として，ほとんど同時に中間状態の原子核によって再吸収され，結果として 2 個電子を放出する．ゲルマニウム 76 がセレン 76 に崩壊する例がここに図示されているように，この崩壊はニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊になる．

量が崩壊の頻度から求められる.（実際上，巻き方の問題を解決する一つの方法という以上に，マヨラナ・ニュートリノの可能性は，おそらく，もっと胸がときめくことである）もし実験で二重ベータ崩壊が検出されない場合は，少なくともこの崩壊がある確率以上で起きないことと，ニュートリノがマヨラナ粒子であるなら，その質量がある値以下でなければならないことを示す.

二重ベータ崩壊を検出するには，この崩壊で生成される 2 個の電子を測定



二重ベータ崩壊において２個のニュートリノが放出される場合は，これらのニュートリノは同時に放出される２個の電子と共に，解放されるエネルギーを分かち合う．そして，電子のエネルギー分布は一般的なベータ崩壊にように連続的になる．しかし，ニュートリノが放出されないなら，２個の電子は特定のエネルギー持って正反対方向に飛び出し，一本のピーク状のエネルギー分布を生じる．

しなければばならない．しかし，検出できない２個のニュートリノが同時に放出されているかいなかを，どのようにして知ることができるのだろうか？　この答えはパウリのニュートリノ仮説の時と同じく，電子のエネルギー分布を調べることである．もし，二重ベータ崩壊で２個のニュートリノが生成される時は，幅の広い連続エネルギー分布が観測される．一方，ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊では，エネルギーと運動量保存則から電子は特定のエネルギーを持つため，そのエネルギー分布は連続分布ではなくスパイク状の鋭いピークとなる．

二重ベータ崩壊は必ず起る．岩石の研究は地球ができてから45億年の間に，二重ベータ崩壊によって不活性ガスが作られることを明らかにした．例えば，キセノン130（陽子54個と中性子76個から構成）は，テルル130（陽子52個と中性子78個から構成）の二重ベータ崩懐から作られる．この崩懐

はごく稀に起こり，テルルの寿命（半減期）は約 1.5×10^{21} 年と推定されている．テルル 130 の小さな鉱石の塊から，年数回の崩壊が起るだろう．

しかし，この二重ベータ崩壊がニュートリノを伴っているのか，そうでないかをどのように判別できるのか？ 地質学的研究は，半減期の大部分がニュートリノ放出を伴う崩壊と矛盾しないという理論を，唯一の拠り所としている．しかし，実験室で研究を行えば，放出される電子のエネルギー分布の測定に期待がもてる．

カリフォルニア大学アーバイン校のマイケル・モーと彼の共同研究者であるスティーブ・エリオットとアラン・ハーンは，二重ベータ崩壊によってクリプトン 82 に転換するセレン 82 を用いて，エネルギー分布を測定する実験を行った．彼らはセレン 14g を薄いマイラーの膜に蒸着して，それを円筒型検出器の中心線上に引き伸ばして張った．この検出器はガスで満たされ，その中心線と円筒壁の間には電場が，さらに同じ向きに磁場がかけられている．中心線上の薄膜から飛び出た電子は，円筒壁の陽極側に向かって走り出し，磁場によって螺旋を描きながら進行する．電子はガス中でイオン化による飛跡を残す．そして，そのイオンは電場の中で押し流されて検出器の壁面にたどり着き，そこに張られたワイヤーにイオン化信号を誘起する．

これらの信号の発生時間と到達位置との相関から，モーと共同研究者達は薄膜のどこから電子が発生したのか，その場所を正確に求めた．この実験では，同一の場所から発生する電子対を選別することができるため，二重ベータ崩壊を探索するのに非常に有効である．その上，磁場中の飛跡の曲率（検出器の壁における信号の螺旋模様に焼き直される）が電子の運動量を表わしている．

彼らは電子対のエネルギー分布を調べたところ，ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊で予測される鋭いスパイク状の分布を見つけることができなかった．その代わりに，僅か数百の電子対のエネルギー分布から，検出器を抜け出ていったニュートリノの存在（ニュートリノの放出を伴う二重ベータ崩壊）を示す，明白な幅の広い分布を検出した．この実験の成功で勇気づけられて，モーと共同研究者達は，38 グラムのセレン 82 を用いた改良型検出器を建設し，邪魔なバックグランド現象を減らすために，この検出器を地下に設置する計画を立てた．この装置を用いることによって，彼らはニュート

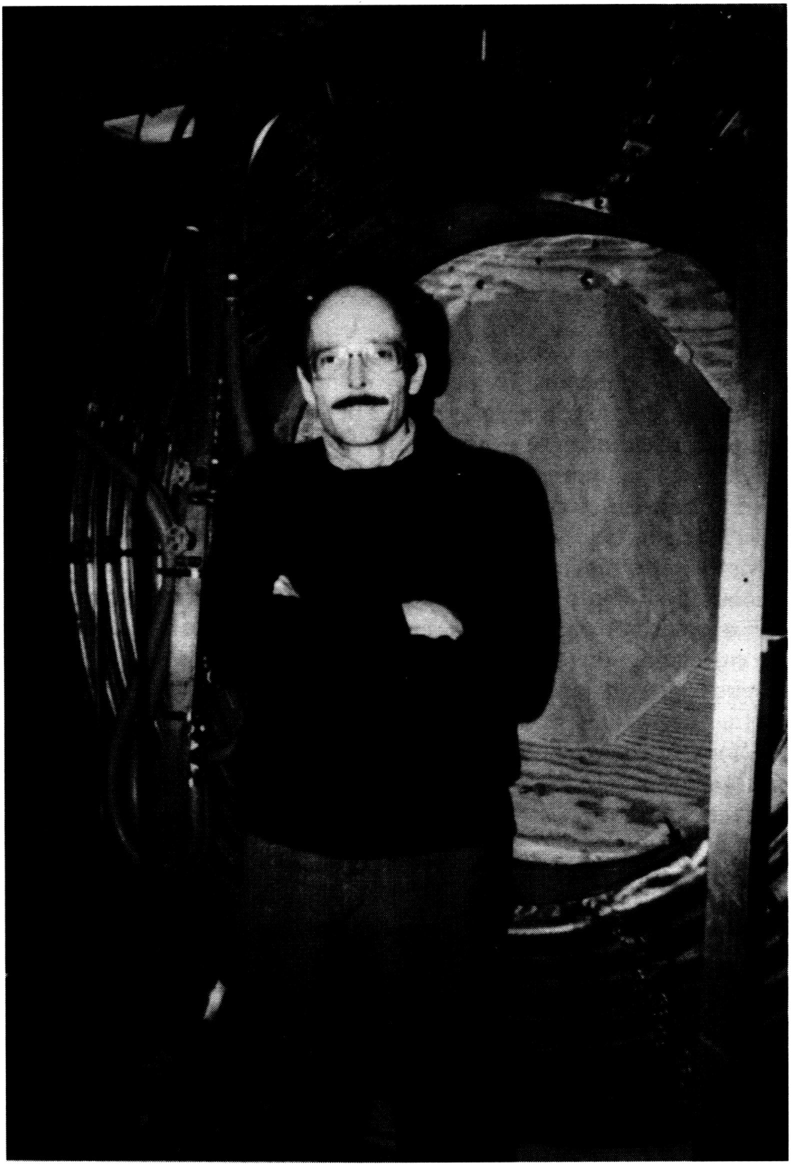
リノが放出されない二重ベータ崩壊をより精密に検出することができるようになり，また，モリブデン 100 のような他の原子核における 2 個のニュートリノの放出を伴う二重ベータ崩壊の寿命測定も可能になった.

しかしながら，ニュートリノが放出されない二重ベータ崩壊を探すもっとも一般的な実験方法は，ゲルマニウム 76（32 個の陽子と 44 個の中性子で構成）がセレン 76（34 個の陽子と 40 個の中性子で構成）に崩壊する現象を検出することである．ここで用いられるゲルマニウムは，マイクロ・エレクトロニクス産業用に精製された，非常に純度の高い半導体物質である．この物質は都合の良いことに粒子検出器にもなる．天然のゲルマニウムはその中にゲルマニウム 76 を 7.8%含んでいるため，それだけで二重ベータ崩壊源と検出器の機能を兼ね備えている.

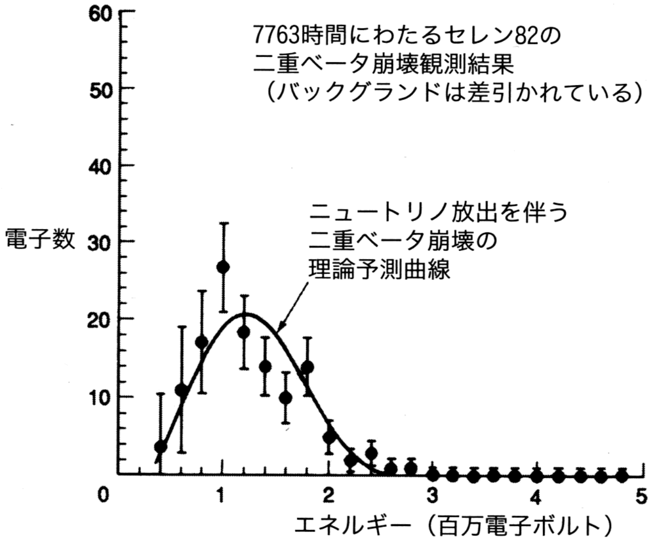
ゲルマニウム 76 からセレン 76 への崩壊は，2.04 MeV のエネルギーを放出する．ニュートリノなしの二重ベータ崩壊の場合は，このエネルギーが全て 2 個の電子に受け渡される．一方，ニュートリノの放出を伴う場合は，このエネルギーは電子とニュートリノで分かち合うため，電子のエネルギーはこの値より小さくなる．そこで，ゲルマニウム検出器を用いる実験では，測定されたエネルギー分布中に 2.04 MeV のスパイクを探すことになる.

これまでのゲルマニウム検出器によるもっとも精度の良い実験結果は，カリフォルニア州シエラ丘陵地帯にあるオロビー・ダムの電力室に置かれた実験装置によって得られた．カリフォルニア大学サンタバーバラ校とローレンス・バークレイ研究所の実験チームは，ゲルマニウム検出器に侵入する宇宙線の頻度を減らすために，地下 200 m にある電力室に装置を設置した．デビッド・コードウェルと共同研究者達は，160 cm^3 のゲルマニウムの結晶 8 本を，熱雑音を減らすためにゲルマニウムを液体窒素温度に保持する低温貯槽の内部に装備した．さらに，検出器はバックグランドとなる荷電粒子やガンマー線を検知するために，ゲルマニウムの周囲を沃化ナトリウムで覆った.

これまでのところ，コードウェルのチームは，ニュートリノの放出を伴わない二重ベータ崩壊の証拠を見つけるにいたっていない．すなわち，エネルギー分布の 2.04MeV には，実験データの統計的変動を上回る鋭いピークはなかった．このデータからニュートリノなし二重ベータ崩壊の寿命の上限値，2.3×10^{24} 年が得られた．さらに，同じデータからニュートリノの質量が 1



モー，彼が作ったタイム・プロジェクション・チェムバー(TPC)の前で．この検出器には磁場を発生するコイルが巻かれている．モーとカリフォルニア大学アーバイン校の彼の仲間達はこの検出器を用いて，二重ベータ崩壊で生成される電子のエネルギー分布を初めて測定した．(提供：M. モー，カリフォルニア大学アーバイン校)

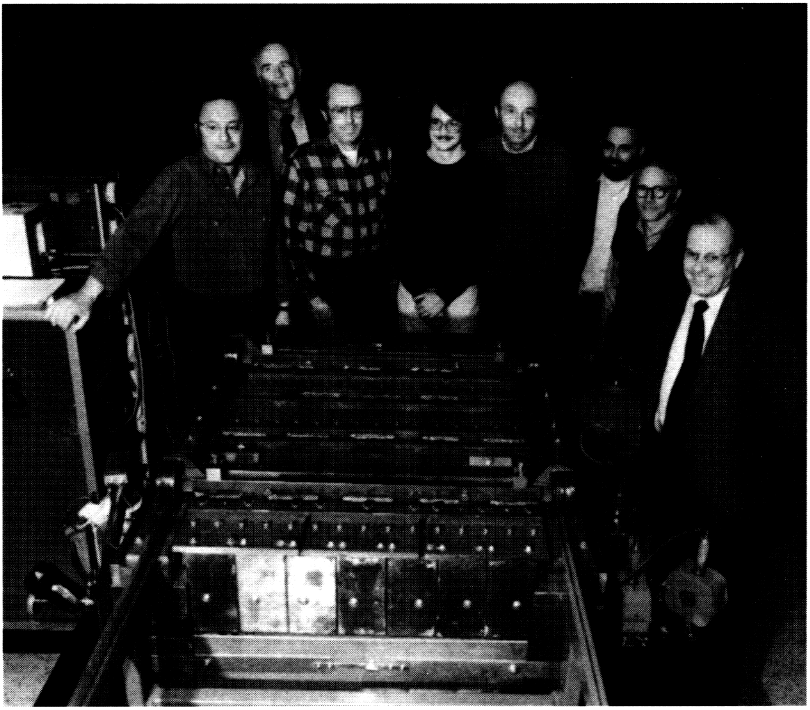


モーと共同研究者によって測定されたセレン82の電子のエネルギー分布は，電子と共にニュートリノが放出される二重ベータ崩壊で予測される連続分布の形を示している.（提供：M. モー，カリフォルニア大学アーバイン校）

電子ボルト以下であるという上限値が与えられた．もし，ニュートリノがマヨラナ型であり（反粒子がそれ自身である粒子）さらに，質量を持つなら，その質量は1電子ボルト以下でなければならない．また，ニュートリノと反ニュートリノが区別できるなら（ディラック型），この実験からは何も言えない．

ニュートリノなしの二重ベータ崩壊を探す多くの実験が，オルビー・ダムの実験場所よりももっと宇宙線遮蔽能力の大きい，世界中のいろんな大深度地下で現在，進行中である[注2]．この状況は，ニュートリノに関わりすぎではないかと思えるほどの過熱ぶりであるが，それでも得られる成果が重大である

注2　その後の実験精度の向上にもかかわらず，ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊現象は検出されていない．しかし，現時点でもニュートリノがマヨラナ型かディラック型かを決めることは素粒子物理学者の最重課題であるため，多くの実験が提案され，質量の上限値も0.3eV～0.01eVまで探索領域を下げることを目指している．



カリフォルニア大学サンタバーバラ校とローレンス・バークレイ研究所のチーム．彼らは，カリフォルニア州にあるオロビー・ダムの地下電力室に設置されたゲルマニウム 76 検出器で，ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊を探索した.（提供：カリフォルニア大学，ローレンス・バークレイ研究所）

ことを思えば，多くの物理学者にとって実験を続ける価値は十分ある．ニュートリノが質量を持つ証拠は，電磁弱理論を超える新しい理論を要求し，おそらく次に訪れる重要な理論的研究の突破口を切り開くであろう．一方，ニュートリノ自身の真の性質は未解決のままであるとはいえ，物理学者は左巻きをニュートリノ，右巻きを反ニュートリノと呼び続ける．私はこの本の残りの全てで区別が必要な箇所では，同じ定義を使う．しかし，次の章ではこの区別が不充分どころか，一種類以上のニュートリノの存在が明らかになる．

第4章

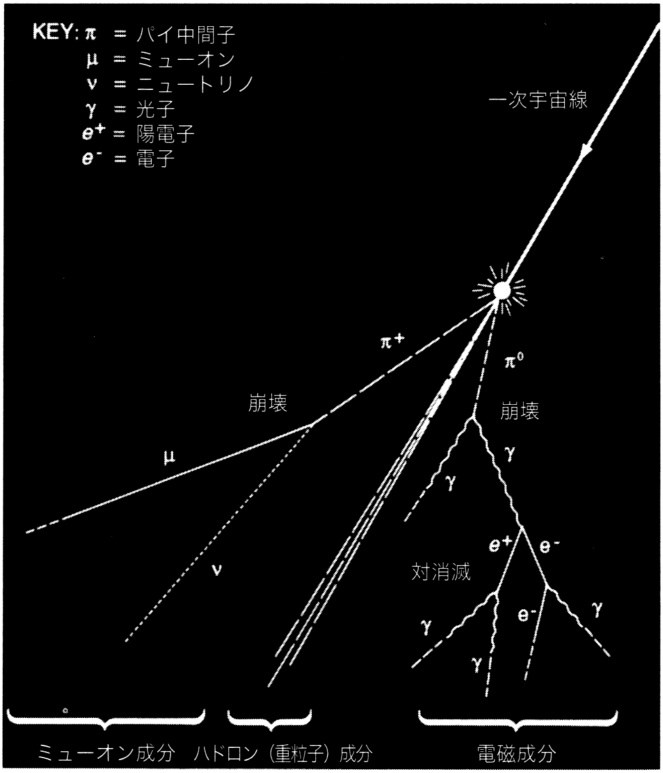
ニュートリノは何種類?

・・・地上に降り注ぐ粒子（宇宙線）は，異常な振る舞いを示した．それらは，電子とも陽子とも違っているようであった．私たちは・・・仲間同士で議論する時には，緑電子とか赤電子と呼んでこの異常さを区別した．ここで，緑電子とは，透過してくる電子，赤電子は吸収されやすい電子を意味する．[1]

カール・アンダーソン，1983.

フェルミが，ニュートリノを一人前の粒子として扱ったベータ崩壊の仮説に始まり，相互作用をとおしてニュートリノの存在を実証したコーワンとライネス実験までの22年間に，物質を構成する基本粒子の研究分野で様々な出来事があった．そして，陽子や中性子などが原子核物理学の対象としてではなく，それらの粒子そのものの特性を研究対象とする新しい物理学の研究領域が育ってきた．1930年から40年代にかけて，素粒子物理学が誕生した．

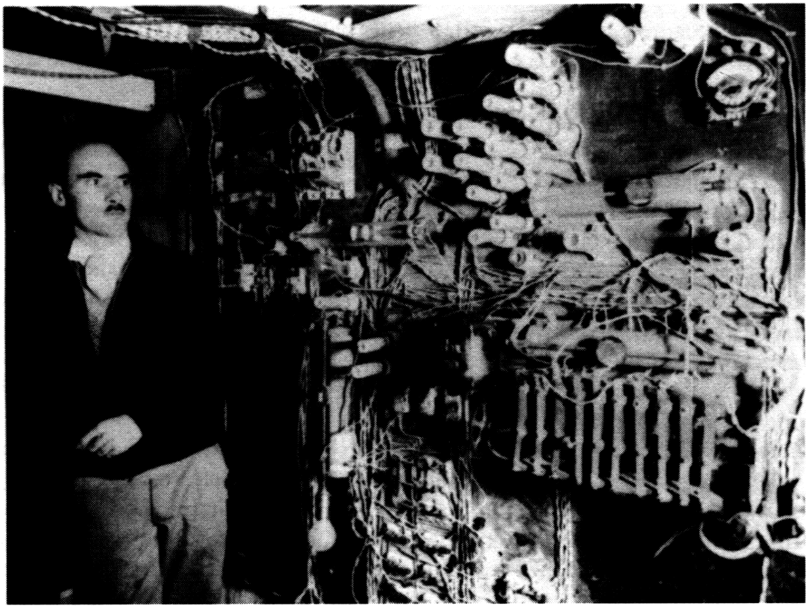
初期の多くの新しい発見は，大気上層で発生する高エネルギー粒子のシャワー，すなわち宇宙線を調べる実験からもたらされた．主成分である高エネルギー陽子やガンマー線は，遠方の星やおそらく他の銀河系から長い旅路の末に，地球の大気に到達する．これらの粒子（訪問者）は，大気上層で空気の原子核と衝突する際に，時には激しく反応し，地表面に向かって雪崩のように増殖する粒子シャワーを生成する．地表面に達するまでにシャワー粒子の多くは，大気中で引き続き反応を起こし吸収される．しかし，あるものは生き残り，私たちの体を通り抜け地中に進入する．宇宙線シャワーの中で作



宇宙空間をかけめぐる高エネルギーの1次宇宙線，主に陽子は絶え間なく地球大気の上層に飛び込んでくる．そして，衝突によってパイ中間子やミューオンを含む2次宇宙線粒子シャワーを生成する．

られる多くのニュートリノは，さらに地球を貫通して裏側から出て行く．

宇宙線シャワーの中で作られ地表に達するある種の粒子は，ここ地球上の物質にとって必要ないような粒子であるという意味で，‘異星人’的である．1930年代半ばには，必要な粒子のリストは整然としていた．原子は電子と陽子，中性子から構成され，それらは光子を吸収したり，放出したりして相互作用する．さらに，ベータ崩壊においては，電子とともにニュートリノを放出して他の原子に転換する．その後，1937年に2人のアメリカ人物理学者，カール・アンダーソンとセス・ネッダーメイヤーは，私たちが今日ミューオ



セス・ネッダーマイヤーとの共同実験でミューオンを発見したカール・アンダーソン．1935 年パイク山頂に設置した霧箱の操作盤の前で．（AIP ニールス・ボアー図書館提供）

ンと呼んでいる粒子を発見した．

ミューオンとはどんな粒子か? この問いに対しては，おそらく‘重い電子’と答えるべきであろう．つまり，ミューオンは電子と非常によく似た振る舞いを示すが，重さは電子の 210 倍もある．このように，ミューオンは電子より重い理由により，永久に生き延びることができない．ちょうど，*中性子が陽子と電子とニュートリノに崩壊することと同様に*，2.2 マイクロ秒(10^{-6} 秒)の半減期で電子と 2 個のニュートリノに崩懐する．私がここで斜体を用いたのは，このことが素粒子物理学に変革を与える鍵となったからである．歴史の最初の部分を順に追ってみよう．

先ずは，この発見のすぐ後に，ミューオンはある役目を担っているかに見えた．1934 年後半に日本の理論物理学者は，陽子と中性子を結びつける力とベータ崩壊現象を同時に解釈する理論を作る中で，ディラック理論，ハイゼ

ンベルグ理論，フェルミ理論の融合を試みた．大阪大学の若い講師であった湯川秀樹は，苦悩の連続によって人生の中でもっとも苦難の歳月に難問，すなわち，核力理論の構築に全力を注いだ．[2]

電磁気の量子理論では，電磁場は光子の媒介として表わされる．二つの荷電粒子は，一方が光子を放出し他方がこれを吸収することによって相互作用を行う．湯川は1932年に，同じような手法を核力に適用することを思いついた．その時の様子を彼は次のように語っている：

> … 核力が電磁気力や重力とは別の3番目の基本的な力に思えた． … つまり，場としての表現を見つけることができるであろうと． … もし，力の場を陽子と中性子との間のキャッチボールのように描けるなら，問題の要点はボール役の粒子の性質を明らかにすることであろう．[3]

湯川の最初の試みは，ハイゼンベルグの理論に従い，陽子－中性子間の核力の担い手に電子が作る場を用いることであった．しかし，この方法は，電子のスピンに関連する困難に突き当たった．そこで，1934年に湯川は，核力場の粒子として，もはや既存の粒子の中に候補がないだろうと結論した．

> 決定的な瞬間が，10月のある夜にやって来た．核力は，10^{-14} cmの桁の非常に近い距離になると有効に働く．私の新しい着想は，この距離と探し求めている新粒子の質量が互いに逆比例の関係にあることを示すことであった．[4]

湯川はキャッチボールのボールの重さを電子の約200倍とすれば，核力の到達距離を正しく再現できることを示した．このような粒子はまだ発見されていなかったとはいえ，彼は苦難の道のりが終わりにさしかかっていることを実感した．それは，峠の頂きで休息をとる旅人が味合う安堵感のようなものであった．[5]

湯川粒子の質量は，アンダーソンとネッダーマイヤーが3年後に見つけた新しい宇宙線粒子の質量と一致した．そのため，この粒子は最初，“メソトロン”として知れ渡った．そして，ヨーロッパやアメリカの物理学者は，湯川理論に注目するようになり，直ちに，メソトロンはこの理論が求めている粒子であると考えた．

湯川理論にでてくる，場の粒子はベータ崩壊でも役割を受け持った．彼はフェルミの一段階反応と異なり，二段階でベータ崩壊を記述した．湯川によ



1935 年に原子核内の陽子と中性子との間で，ちょうど量子キャッチボールのごとく投げ取りされる粒子の存在を示唆した湯川秀樹．現在パイ中間子と呼ばれているこの粒子は，1945 年についに発見された．(関連記事)

れば，中性子は場の粒子を放出して陽子に変わり，引き続き，場の粒子が電子とニュートリノに変換することになる．そこで，もしメソトロンが湯川理論の場の粒子であったなら，電子とニュートリノに崩壊することが期待される．しばらくの間は，もっともらしく思えた．

1940 年代の初めに英国アバリストーイスにあるウェールズ大学の E.J. ウィリアムズと G.F. ロバーツは，宇宙線メソトロンが電子に崩壊しているような数枚の写真を発表した．彼らは，霧箱の中を通り抜ける粒子の飛跡を記録した．霧箱とは，箱の中に過飽和状態のガスをつめ，これを急に膨張させることによって，ガスの中を通過する粒子が起こすイオン化の道筋（飛跡）に沿って，霧状の水滴が凝集する装置のことである．しかし一般に，イオン化

能力の低い電子が作る飛跡を捕らえることは難しかった．このため，メソトロン崩懐のより決定的な証拠がもっと必要であった．

その後の数年間は第二次世界大戦にもかかわらず，世界中の多くの物理学者はメソトロンの研究に傾倒した．また，数人の実験家はメソトロンが2マイクロ秒より少し長い寿命で崩壊することを確認した．しかしながら，もっとも重大な結果は，ドイツ占領下で隠れて研究をしていたイタリア人グループの実験によってもたらされた．

1945年のローマ自由同盟後も研究を続行していたマルセロ・コンベルシとエトーレ・パンチーニ，オレステ・ピッチオーネは，宇宙線メソトロンが湯川理論の場の粒子ではありえないことを示す観測結果を得た．要するに，負に帯電した湯川粒子は，物質中ですぐに原子核に捕獲されるはずである．原子核の正荷電に引き寄せられるやいなや，メソトロンは原子核の強い核力によって，ただちに呑み込まれるものと考えられる．しかし，この過程が起きないことが実験で示された．どのメソトロンも強い核力の影響を受けなかった．このため，陽子と中性子を共に結び付ける湯川によって考案された粒子ではないであろう．

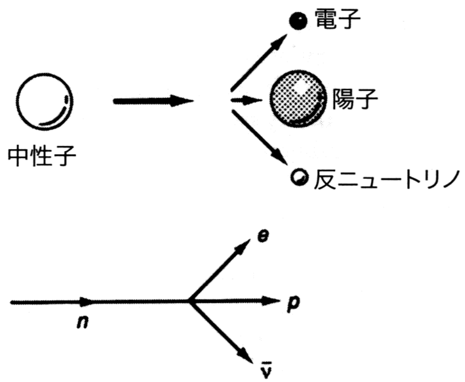
3人のイタリア人がこの結果を論文で発表した直後に，ブリストル大学のチームがピレネー山脈のある山頂で行なわれた高地実験において，宇宙線中に他の種類の粒子の存在を見つけた．今や全ての話が出そろった．この新しい粒子は，まさに湯川粒子として期待される振る舞いを示すことがわかった．さらに，この新粒子は低い高度での実験でも十分に調べられ，より物質透過力の強いメソトロンに崩壊することが確認された．

重い電子

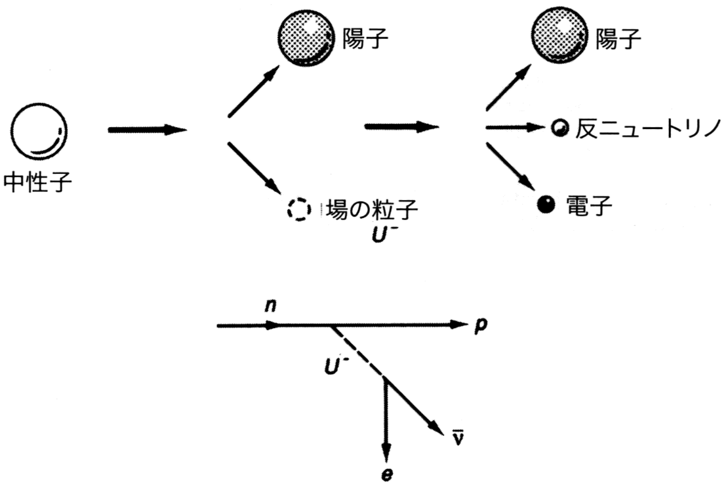
ミューオンと電子に対して，質量が大きく異なる以外，全く性質の違いを見出せない。このことは，現代物理学における最大の関心事の一つである.[6]

レオン・レーダーマン，1963

こんにち私たちは，ブリストル大学のセシル・パウエルと彼のチームが発見した粒子をパイ中間子と呼んでいる．そして，この粒子が崩懐する時に生



フェルミのベータ崩壊



湯川のベータ崩壊

フェルミのベータ崩壊理論では，中性子は直接，電子と反ニュートリノを放出して陽子に転換する．湯川はそうではなく，中性子は中間粒子（図中の U^-）を放出して陽子に変わると考えた．この中間粒子がすぐに電子と反ニュートリノに崩壊すれば，最終結果は同じになる．矢印の入った直線で素粒子反応が表されている最下段の図は，U^- の役割がより明確である．

成される粒子を，ミューオンと呼ぶ．私たちはコンベルシ達が最初に明らかにしたように，この2つの粒子は非常に異なった性質を持っている．パイ中間子は陽子や中性子と同様に，原子核の内部で強い力の作用を受ける．一方，ミューオンは電子のように強い力を受けないが，中性子と同じく崩壊する．

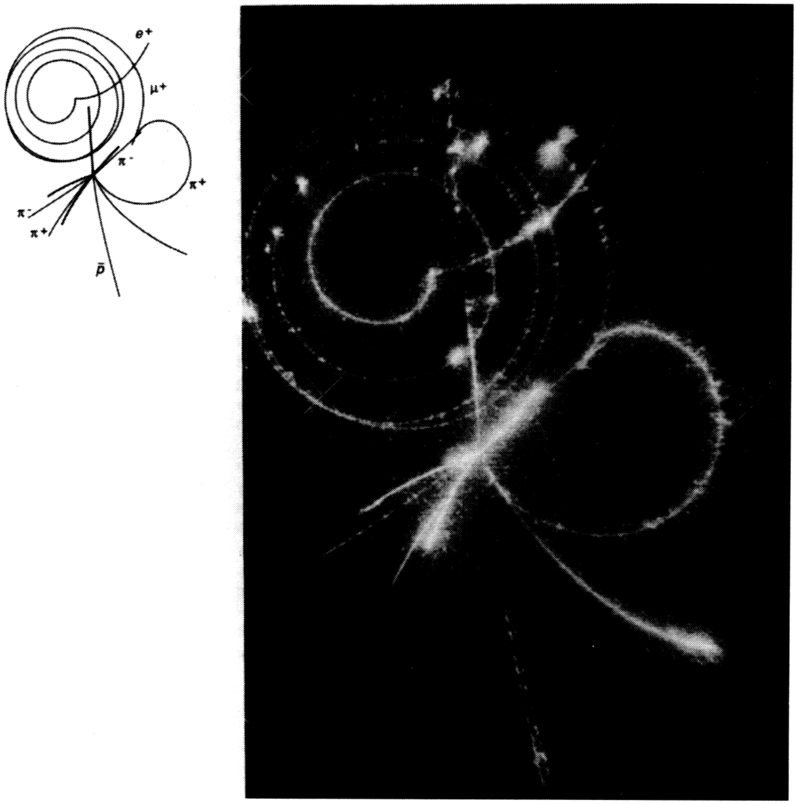
どのくらい中性子らしいかは，コンベルシやパンチーニ，ピッチオーニらが実験結果を発表してから1940年代後半にかけて明らかになってきた．彼らの発見で刺激を受けた物理学者の一人に，以前ローマ大学のフェルミ・グループの一員で，現在カナダで研究をしているブルーノ・ポンテコルボがいた．

... 私は彼らの論文を読むやいなや，現在ミューオンと呼ばれている粒子に魅了された．それは確かに興味をそそる粒子であった．すなわち，湯川によって要求され，アンダーソンによって発見され，コンベルシ達によって湯川粒子といっさい係わりないという，ひどい仕打ちを受けることになったからである．私は独断に陥らないよう，自分自身に言い聞かせた．そこで，まず最初に，あらゆる疑問を並べることにした．... ミューオンは電子と2個のニュートリノ，または電子と光子に崩壊せず，電子とニュートリノに崩壊すべきであると誰が言ったのか？ ミューオンの崩壊で放出される荷電粒子は本当に電子なのか？[7]

ポンテコルボは，ただちに電子とミューオンが原子核によって吸収される頻度がきわめて類似していることに気付いた．電子捕獲過程はベータ崩壊と同等である．つまり，原子核中の陽子が近くにいる電子を捕らえて中性子に変換し，同時にニュートリノを放出する．そこで，1947年6月にフィジカル・レビュー誌に投稿した論文で，ポンテコルボは陽子がミューオンを捕獲する時，陽子はニュートリノを放出して中性子に変わることを提起した．

翌年，イタリアのジアンピエトロ・プッピとストックホルムのオスカー・クラインはそれぞれ独立に，ミューオンの捕獲と崩壊があまりにもベータ崩壊と密接に関係している点に着目した．そして，ベータ崩壊のフェルミ理論をミューオンの相互作用に関与する粒子を用いて書き換えられることを示した．ここで，非常に興味深いことは結合定数に関してであった．結合定数とは，粒子が始状態から終状態にかわる時の相互作用の強さを与える定数である．

ミューオン崩壊の結合定数は，ベータ崩壊に対して計算されたものとほとんど同じ値を持つことが判った．この発見は，同一の基本的な相互作用によって引き起こされていること，つまり，同じ力が中性子とミューオンの死に関



正荷電パイ中間子が正荷電ミューオンに，そしてこのミューオンが直ちに陽電子に崩壊する全過程が，ストリーマ検出器で捕らえた粒子飛跡の写真の中に写っている．写真中央部で起こった陽子－反陽子反応によって生成されたパイ中間子は，四方八方に飛び出る．粒子は磁場の影響を受けて曲げられ，渦巻き状の飛跡を作る．飛跡の突然の進路変化は崩壊を示す．そこでは，検出器をすり抜けて行ったニュートリノも同時に作られる．(G. ピラジーノ提供：セルンでの PS179 実験)

与していることを意味している．さらに，異なった種類の粒子に普遍的に作用する新しい力の存在をも示唆する．この新しい力は，例えば粒子間に働く電磁気力による反応と比べて，極めてゆっくりと進行することから，弱い力として知られるようになった．このようにゆっくり起る相互作用は，結合定数が比較的小さいこと，つまり，力が弱いことを反映している．

一方，ポンテコルボはミューオンに釘付けであった．そして，宇宙線物理

学に関するできる限りのことを学んだ．彼はテッド・ヒンクスと非常に楽しい，忘れることのできない，興奮させられる共同実験チームを組んだ．[8] そしてすぐさま，ミューオンの研究，特にポンテコルボを虜にした疑問の答えを探る実験の準備を行なった．

彼らはオンタリオにあるチョークリバー研究所の原子炉物理部門で研究をしていたため，宇宙線研究を行うことにある種の罪悪感をつのらせていた．[9] しかしながら，それをはねのけて，数々の疑問に対する答えを見出した．ミューオンが崩壊する時に放出される荷電粒子が電子であることは正しい．ミューオンが電子と光子に崩壊することは間違い．ミューオンが電子とニュートリノに崩懐することは間違い．実際は，ミューオンは中性子と同じく3個の粒子に崩壊する．ポンテコルボとヒンクスは，ベータ崩壊と同様に連続分布を持つ放出電子のエネルギー分布の測定によって，このことを検証した．他の研究者も同様の結果を得た．特に，シカゴ大学のジャック・シュタィンバーガーは，ミューオンが3個の粒子に崩壊することを見つけた．シュタィンバーガーについてはあとで，もっと詳しく紹介する．

1種類のニュートリノか，または2種類？

1956年にコーワンと私は，加速器を用いて2個のニュートリノが同一かどうかを確かめる実験を提案した．私たちがロスアラモス研究所から得た感触は理解に苦しむものであった．・・・“あなた方2人は既に十分に楽しんだはずだ．なぜ，本来の仕事に戻らないのですか．”[10]

フレッド・ライネス，1982

ヒンクスとの実験から10年が過ぎた．ポンテコルボは1950年にカナダからソビエトに移り，モスクワ郊外のドゥブナにある原子核共同研究所で研究をしていた．1959年始めに，彼はこの研究所が建設を計画していた陽子加速器を用いて，どのような研究が可能であるかを検討する機会に出会った．一つの着想はニュートリノを作ることであった．

最初の粒子加速器は1930年代初頭に建設された．これらの加速器は，電子または陽子の粒子群に瞬時にエネルギーを付与することを繰り返す．その結果，放射性物質から放出される粒子よりも桁はずれに大きなエネルギーを



1948 年当時のブルーノ・ポンテコルボ．彼はニュートリノ研究に関する数々のアイディア，すなわち，ミューオンの崩壊実験，原子炉や加速器を用いるニュートリノ研究，ニュートリノが他の種類に転換するニュートリノ振動などを提案した．(AIP ニールス・ボアー図書館提供)

持ち，制御可能な，強力な粒子源が得られる．最高エネルギーということ以外は，宇宙線と非常に良く似ている．

ポンテコルボはまだカナダにいた 1946 年に，原子炉が有力なニュートリノ源であることを示した．そして，ニュートリノを検出する手段の検討を開始した．(この研究が，塩素－37 をニュートリノ検出の標的物質として使用する発案となった．第 3 章で述べたように，後で，レイモンド・デービスが行った実験がこれである．コーワンとライネスがポンテコルボの研究に気づいていなかったことは明らかであった．数年後，彼らは独自にニュートリノ源として原子炉を選び，その頃考案された液体シンチレータを検出器に用いた.) ドゥブナへ移ることを契機に，ポンテコルボは原子炉によるニュートリノ物理学から身を引いたが，1959 年になって再びにニュートリノついて考え

を巡らした．今度は，加速器でニュートリノを作る案である．

1950 年後半までに，加速器でパイ中間子を作る方法は確立していた．加速器から取り出される高エネルギー陽子は金属標的を叩くと，この時，宇宙線が上空で大気と衝突する時のように，エネルギーの高いパイ中間子が大量に生成される．次にパイ中間子はミューオンとニュートリノに崩壊する．ポンテコルボはこれらのニュートリノを利用しようと考えた．

彼が考案した実験の一つは，ミューオンとパイ中間子の崩懐の際に放出される中性粒子の性質を調べることであった．ヒンクスとの共同実験から，ミューオンが崩懐する時には，電子とともに 2 個の中性粒子が生成されることが判っていた．しかし，これらの中性粒子は本当にニュートリノなのか？ もしそうなら，それらのニュートリノは同一のものか？ さらにパイ中間子はミューオンと中性粒子に崩壊する．この中性粒子は原子核のベータ崩壊の時に放出されるニュートリノと同じものか，あるいは別物か？

当時，1 種類以上のニュートリノが存在するかもしれない特別の理由があった．このことはミューオンの崩懐に関わる難問と直面する．これまでに，物理学者はミューオンが電子とニュートリノと反ニュートリノに崩懐すると信じていた．また彼らは，粒子と反粒子は電子と陽電子のように常に消滅すること... つまり，双方の量子数が完全に消滅して全質量がエネルギーに転換し，ガンマー線（光子）になることを知っていた．そのため，物理学者は自問した“なぜ，ミューオンの崩懐で作られるニュートリノと反ニュートリノがただちに消滅して，電子と一緒に光子が放出されないのか？”

ポンテコルボとヒンクスが検証したように，ミューオンが電子と光子に崩懐しないことは明らかであった．さらに，幾つかのより精度の良い実験もこのことを確認した．にもかかわらず，ミューオンがこのような崩懐をすべきでないという理由は見当たらなかった．逆に，弱い相互作用に関する他の疑問を解決する理論は，このような崩懐が実験によって検出されない検出限界の数千倍も高頻度で起ることを示唆した．

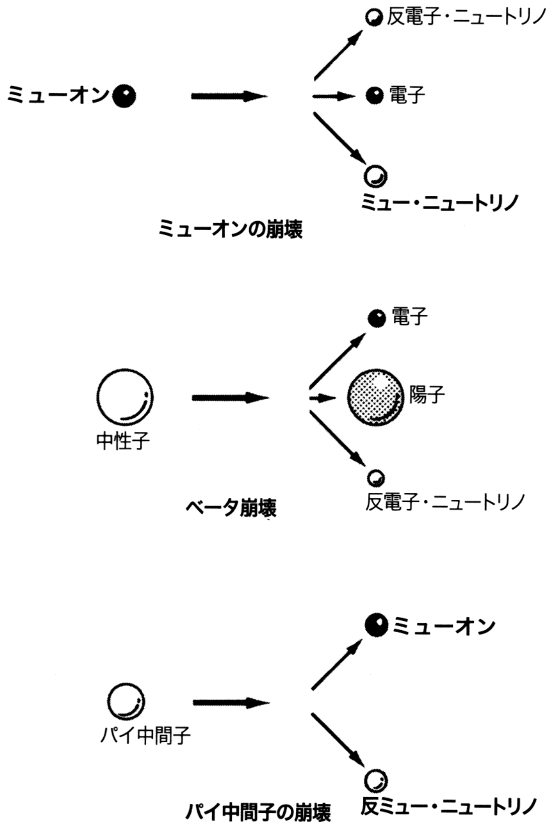
しかしながら，この矛盾に対して 1 つの解決策があった．仮に，ミューオン崩懐で生成されるニュートリノと反ニュートリノが，異なった種類であるとしよう．この場合，この 2 つの粒子の量子数は全て打ち消し合わないため，消滅できないことになる．では，2 種類のニュートリノはどこが違うのか？

この疑問を解くために，物理学者は物理過程が保存則によって支配されるという観測事実を指導原理にした．例えば，私たちが観測する全ての現象は，エネルギーと運動量を全体で保存する．この規則に従わない現象は観測されていない．(ボーアが原子核物理学，すなわちベータ崩壊の難問が，エネルギー保存則の破れを仮定することによって解決するだろうと提案した時のパウリの驚きを思い出して下さい）このため，ミューオンが電子と光子に崩壊すると，いくつかの基本的な保存則を破るために，このような崩壊が起きないということはもっともらしく思える．問題は，どのような性質が保存されるのかを発見することであった．そして，以下のように議論が進行していった．

ミューオンの崩壊によって生成されるニュートリノは，ミューオンの何らかの性質，“ミューオンらしさ”を保持するものとしよう．同時に作られる反ニュートリノは，異なる種類であるため“ミューオンらしさ”が無いが，代わりに“電子らしさ”に関する性質を持つ．反ニュートリノのこの性質は，崩壊の際に生成される電子の“電子らしさ”によって打ち消されるべきものである．つまり，電子は粒子で，一方，反ニュートリノは反粒子のためである．このように考えれば，全体の“ミューオンらしさ”はニュートリノの生成によって保存され，ミューオンが崩壊する前はゼロであった“電子らしさ”は，反ニュートリノと電子の対生成によってゼロに保たれるであろう．

原子核におけるベータ崩壊でもこのような保存則が満たされるべきである．ここでは，反ニュートリノが電子と共に作られる．この反ニュートリノは“電子らしさ”を運ぶ．一方，パイ中間子の崩壊の際にミューオンと同時に作られる粒子（反ニュートリノ）は，同じ考察から“ミューオンらしさ”を持つであろう．かくして，“電子・ニュートリノ”と“ミュー・ニュートリノ”は2つの異なった粒子であろう．

“電子・ニュートリノ”と“ミュー・ニュートリノ”の違いを調べるためにポンテコルボは，パイ中間子の崩壊に伴ってミューオンと同時に生成されるニュートリノを，コーワンとライネスが用いたものと同様の検出器に入射させることを提案した．この考えの要点は，ニュートリノを吸収するベータ崩壊の逆反応において，生成される電子の検出数を計測することにある．もし，ミュー・ニュートリノがベータ崩壊で電子と一緒に作られるニュートリノと異なっているならば，この逆反応は起らないことになる．すなわち，電子は



ミューオンが崩壊する時に放出されるニュートリノと反ニュートリノが，対消滅を起こして光子を出さないという事実は，次のように理解できる．これら2つのニュートリノは，もともと電子やミューオンの種類に関する固有の性質が異なっている．このため弱い相互作用において，ここで図示されているように，“ミューオンらしさ”を持つ粒子（ミューオンとミュー・ニュートリノ）は，他の“ミューオンらしさ”粒子にのみ崩壊することができる．また，他の“ミューオンらしさ”を持つ反粒子との対生成でのみ作られる．同じことが“電子らしさ”を持つ粒子（電子や電子・ニュートリノ）についても言える．

検出されないだろう．ポンテコルボが実験を計画した加速器は日の目を見なかったが，大陸をまたいだニューヨークで，若いアメリカの物理学者が同じ考えを抱いた．

メルヴィン・シュワルツは，コロンビア大学が脚光を浴びていた時期の物理学教室の一員であった．ラザフォードがいた頃のケンブリッジ大学キャベンディッシュ研究所や，フェルミがいたローマ大学物理学教室のように，コロンビア大学は紛れもなく，“アイディアのるつぼ”となっていた．当時のコロンビア大学のタレント陣の中で，もっとも華々しいスターの一人が 1957 年にチェン－ニン・ヤンとともにノーベル賞を受賞したツン－ダオ・リーであった．彼らは，弱い力が鏡映対称性に従わないこと，すなわちパリティ非保存として知られている現象（第 3 章参照）が起ることを明らかにした．リーは現在，ミューオンや中性子のような粒子が崩壊するエネルギー領域ではなく，より高いエネルギー領域で弱い力がどのように働くのかということに注目していた．特にコヒータイムの時に，彼のアイディアを実験研究者仲間と議論したことを，シュワルツは次のように回想している：

1959 年 11 月のある木曜日の午後，私はたまたまコヒータイムに遅れて行った．そこには，リーを囲んで活発な議論をしているグループがあった． … そこでは，高エネルギー領域での弱い相互作用を測定するもっとも良い手法が検討されていた．これまでに知られている陽子，電子，中性子などのあらゆる粒子ビームを用いて実現される，おびただしい数の反応例が黒板に書かれていた．しかし，これらのどれも最適とは思えなかった …

その晩，私の頭の中にある考えが浮かんだ．それはまったく単純なものであった．成すべき事はただ一つ，“ニュートリノを用いることである …[11]

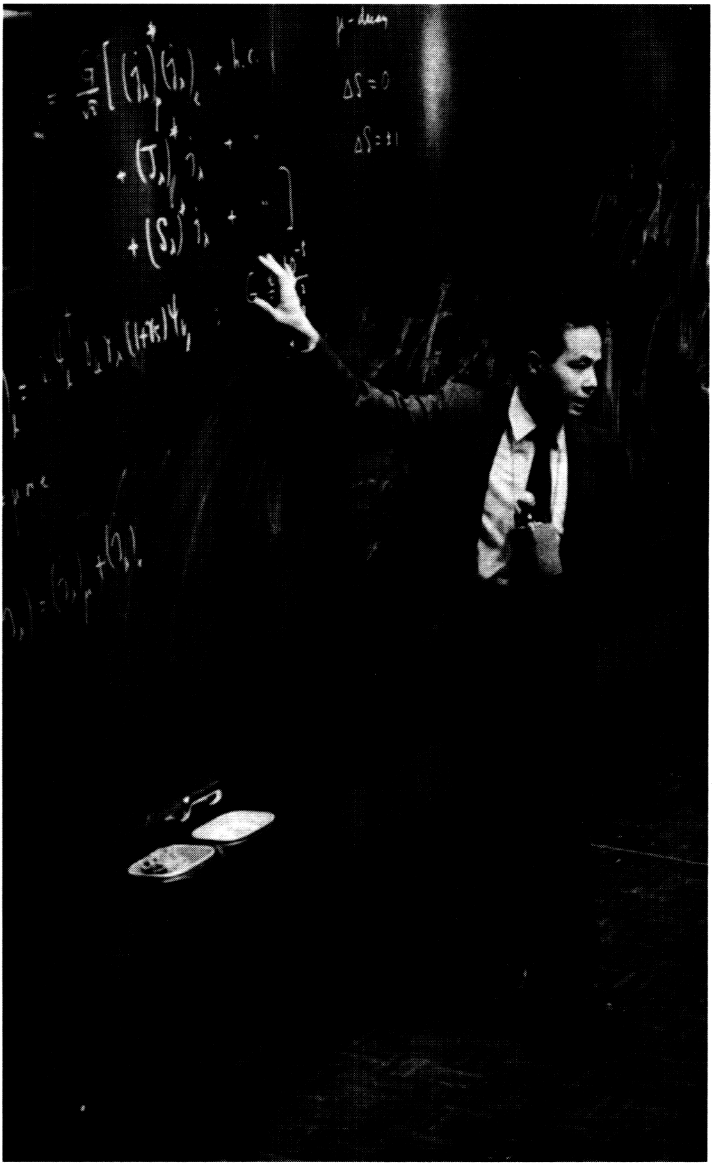
弱い力を研究する場合には，ニュートリノは他の種類の粒子と比べて格段の利点を持っている．電気的に中性であり強い核力に不感で，唯一，弱い相互作用を通してのみ他の粒子と反応するからである．そこで，ニュートリノを用いた実験を行えば，弱い力の効果がより強い電磁気力や核力の効果に覆い隠されずにすむであろう．シュワルツはニュートリノを作る方法を探るべきだと信じた．

シュワルツはポンテコルボと基本的には同じ考えに達していた．そして，彼はニュートリノ・ビームを発生させて，それを使用する方法を調べた．高エネルギー陽子が金属片標的に衝突すると，陽子とほぼ同じ方向に進むパイ中間子を生成する．このパイ中間子が崩壊すると，今度はニュートリノが発生する．ニュートリノは，若干広がりはするけれどもパイ中間子の方向を維持

する．1950年代後半に利用できた大型加速器が作り出す典型的なエネルギー領域では，パイ中間子は崩壊するまでに平均50mの距離を飛ぶことができる．一方，その後に作られるニュートリノは，パイ中間子の方向から10度以内に収まって飛行する．ニュートリノが大きく広がってしまうことを避けるために，シュワルツはパイ中間子が生成される標的から10mの場所に，厚さ10mの遮蔽壁を置くことを提案した．パイ中間子の約10%がこの10mの距離の中で崩壊する．残りのパイ中間子は崩壊によって生じたミューオンと同様に，遮蔽壁に吸収される．そして，パイ中間子の崩壊によって発生したニュートリノのみが壁を透過していく．

それから，シュワルツは検出器の中で反応を起こすのに十分な強度のニュートリノ・ビームを作るには，どのくらいの数の陽子を加速することが必要かを計算した．ここで，ベータ崩壊で発生するニュートリノに比べて，エネルギーが高いことが手助けしてくれる．1937年にすでに2人の日本の理論物理学者の朝永振一郎と玉木英彦が計算したように，ニュートリノの反応確率はエネルギーとともに急速に増加する．反応断面積は，ベーテとパイエルスが数MeVのエネルギーを持つ原子炉からのニュートリノに対して計算した値，$\sim 10^{-44}$ cm^2 から百万倍も増えて，当時の最高エネルギーの加速器が作り出す数百MeVのニュートリノでは，$\sim 10^{-38}$ cm^2 になる．

シュワルツは10トンの標的物質を持つ検出器を建設すると仮定し，検出器内で1時間あたり1個の反応を起こすには，毎秒5×10^{12}個の陽子を加速できる加速器が必要であると推定した．この量は，当時ニュートリノの生成に使えそうな，どの加速器の陽子強度をはるかに越えていた．しかしながら，研究者達は新しい大強度加速器を作る方法を検討した．そこで，シュワルツは1960年3月に自らのアイディアをフィジカル・レビュー・レター誌に投稿した．当然，彼はリーとこのアイディアについて議論した．そして，リーは同寮のヤンと一緒に“ニュートリノ・ビームを用いる実験から何がわかるか”という論文を書いた．この論文は，シュワルツの論文の直後にフィジカル・レビュー・レター誌に掲載された．期待される成果のリストの第一番目は，パイ中間子の崩壊と中性子の崩壊によって生成されるニュートリノが，同一かどうかを調べることであった．



1965 年に欧州素粒子研究所（CERN）で弱い力について講義するツンーダオ・リー．ヤンとともに，弱い力の高エネルギー領域での振舞いに関する理論を検討する中で，リーは同じコロンビア大学の実験者，メル・シュワルツに多大な影響を与えた．そして，シュワルツは，弱い相互作用を研究するためのニュートリノ・ビームを発生させる手段を考案した．(CERN 提供)

最初の高エネルギー・ニュートリノ実験

原子力委員会，ブルックヘブン国立研究所，神様，グリーン，それにヘイワース（以上アルファベット順）の御慈悲により，私たちはニュートリノと出会えたのだ.[12]

レオン・レーダーマン，1960

この実験は直ぐに実現できるような代物ではなかったとはいえ，ニュートリノ・ビームのアイディアがあまりにも不確定要素が多く，実験の立ち上げは難航した．しかし，コロンビア大学の少なくとも数人の物理学者は関心を持った．特に，レオン・レーダーマンとジャック・シュタィンバーガー（彼らはシュワルツの博士論文の指導教官であった）は，この実験の提案を棚の中に仕舞い込むことを拒否した．二人はリーと旧知の仲であり，弱い力の研究を新しい領域に拡張しようとするリーの挑戦に同調していた．

レーダーマンとシュタインバーガーは，共同ですでに幾つもの重要な実験を行っていた．シュタインバーガーは 1949 年にシカゴ大学においてフェルミの指導の下で行った博士論文の実験で，ミューオンが 3 個の粒子，すなわち 1 個の荷電粒子と 2 個の中性粒子に崩壊することを見つけた．それは，ヒンクスとポンテコルボが独自に発見したのとほぼ同時期であった．レーダーマンは 1948 年から 1951 年の間コロンビア大学の大学院生であったが，1957 年にリーとヤンの要請により，ミューオン崩壊の対称性に関する研究を行った．この実験はリーとヤンが提唱した，弱崩壊（弱い力で起る崩壊）が空間対称性を破ることを確認するものであった．そして，同じ年にコロンビア大学のシュワルツを含むシュタインバーガーのグループは，再びリーに触発されてハイペロンの弱崩壊において，再びこの非対称性を発見した．ハイペロンとは陽子や中性子と同類であるが，より質量が重くそれゆえ短寿命の粒子である．

レーダーマンとシュタインバーガーはシュワルツと一緒に，ニュートリノ・ビームを作る構想をめぐらしていた．特に，彼らはロングアイランドの近くにあるブルックヘブン国立研究所（ここは彼らが以前，コスモトロンと呼ばれた古い加速器を用いて実験していた場所である）に，新しい加速器を建設する考えを抱いた．この加速器はコスモトロンが到達可能なエネルギーの 10 倍にあたる，30GeV（30 ギガ電子ボルト）まで陽子を加速できるように設計

された．しかし，“はたして実験できるくらいの十分な数のニュートリノを生成できるのか”が不安材料であった．“私たちは議論を続けた...多分，ブルックヘーブンの加速器をもってすれば達成できるはずであった”[13]とレーダーマンは当時を回想する．そして，ついに目的がかなえられるような青写真を作り上げた．

この青写真の中で明記されていた要請の一つは，1日あたり僅か2〜3個の反応事象とはいえ，これを発生させるためにできるだけ多くのニュートリノを捕獲する大量の標的物質を用意することであった．一体，10トンもの大型検出器をどうやって作ればよいのか？ しかし幸いなことに，そう遠くないニュージャージのプリンストン大学で，ジェイムス・クローニンとジョージ・レニガーは，この答えになるような新しい検出器を開発していた．それは，スパーク・チェンバー（放電箱）であった．

簡単なスパークチェンバーは，ある特殊なガスを満たした金属箱の中に平行金属板を何層にも重ねた構造を持つ．荷電粒子がスパークチェンバーを通過すると，その痕跡として電離した原子を残す．もし，金属板の間に充分な電場が存在すれば，ガスは放電して火花を生じる．このようにして金属板間に，粒子の飛跡を示す火花の連なりが残ることになる．これを写真に撮れば記録できる．

スパークチェンバーの原理は1960年に，最初は英国人，続いて日本人によって発案された最新の手法であった．クローニンとレニガーは米国で最初のスパークチェンバーを組立て，その性能試験を行っていた．このスパークチェンバーは，厚さ6mmで有効面積320cm^{2}のアルミニウム19層でできていた．全重量は10kg位であった．シュワルツや彼の仲間達にとって，この検出器がニュートリノを検出する装置として，理想的であることが一見して明らかであった．

その理由の一つは，スパークチェンバーが記録媒体となることである．つまり，イオン化の痕跡は，電場を発生させるための高電圧を印加するまで残っている．このため，近くに他の検出器を置いてスパークチェンバーに粒子が通過したことを確認し，その時だけ高電圧をかけるための駆動信号を作り，スパークチェンバーに高電圧を印加すれば火花放電が得られる．このようにして，粒子が通過して興味ある現象が起っていそうな時にのみスパークチェン

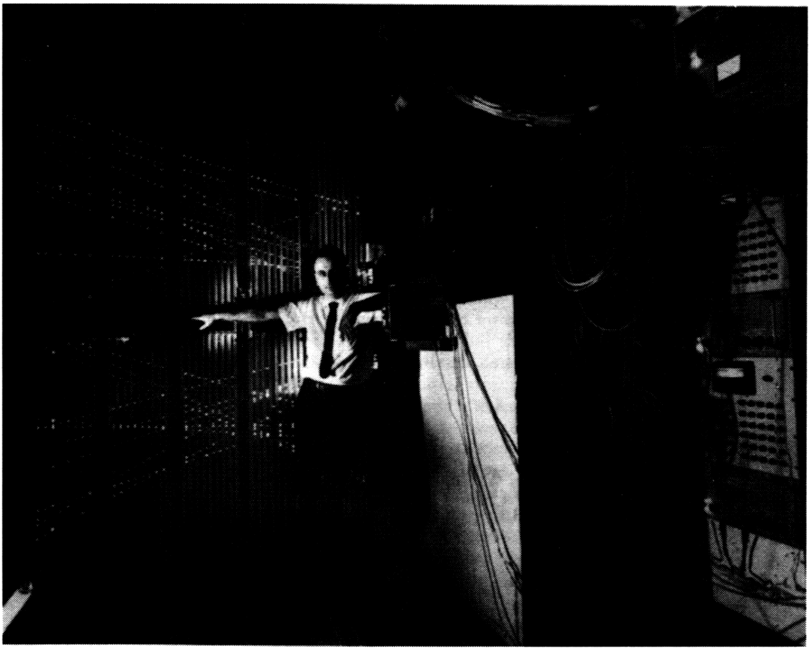
バーを作動させ，写真を撮ることが可能になる．ほとんどが相互作用せずに，検出器を通り抜けるニュートリノに対する検出器として，このスパークチェンバーの動作原理は有効である．

2つ目は，10トンのスパークチェンバーを作るのに，常識外れの大きさにすることなしに，また多額の経費を投入することもなくできることである．金属板は単に層数を増やせば，十分な重量を確保できる．しかし，“単に”とは言い過ぎかもしれないが，このような大胆さが肝心であった．1960年9月にバークレイで開かれた会議において，クローニンはつい1ヶ月前に10kgのスパークチェンバーで撮った最初の粒子飛跡像のいくつかを発表した．同じ会議でレーダーマンは，10トンのスパークチェンバーについて最初の提案を行った．その経費は7万ドルと推定された．

一方，ブックヘーブン国立研究所における新しい加速器は運転を開始していた．そして，十分な量のニュートリノ・ビームを生成できる見込みは日増しに高まった．コロンビア大学のニュートリノ・チームは一大決心で作業にとりかかった．シュタインバーガーとレーダーマンが率いるこのチームは，最終的には大学院生のマーク・ガイヤー，ディノ・グリアノス，ナリマン・ミィストリイ，ブックヘーブン国立研究所の物理学者ゴードン・ダンベイ，それにもちろんシュワルツが参加していた．

スパークチェンバーの大型化の要請から，クローニンのオリジナル版を約10倍にする必要があった．それは，2.5cm厚で120cm^{2}の有効面積を持つアルミニウム板90層から構成された．検出器はそれぞれ9層のアルミニウム板を持つ1トン検出器を10組連ねたものであった．アルミ板の間には，プラスチック製の窓枠が取付けられた．この窓枠は間隔が1cmで，検出器の外壁と各層にネオン・ガスを封入する役目を果たす．10組の検出器は2行5列に積み重ねられて並べられた．

ニュートリノそれ自身は検出器の中でイオン化の痕跡を残さずに通過する．しかし，アルミニウム板中で起こるニュートリノ反応によって作られたミューオンや，電子などの全ての荷電粒子は，火花による飛跡を作る．目的はこのような荷電粒子が生成された時はいつでも，火花が連なる飛跡を可視化するために，高電圧供給装置を駆動することであった．きらめく閃光は各層の積層構造を側面から，つまりプラスチック窓側から覗くカメラによって写真撮

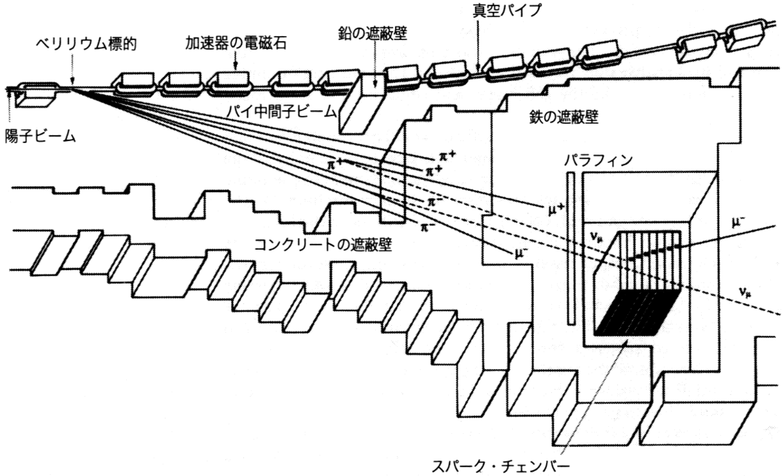


“2 種類のニュートリノ検証” 実験で使用した，10 トンスパークチェンバーの前に立つメル・シュワルツ．検出器は 10 組のモジュールからできていて，各モジュールには，2.5cm 厚のアルミニウム板が 9 枚（総重量 1 トン），それぞれ 1cm 幅のガス注入壁で仕切られて配置されている．このアルミニウム板の間に印加される高電圧によって，荷電粒子の飛跡に沿ってガス放電が起こる．この写真に映っている現象は，宇宙線によるものである．(ブルックヘブン国立研究所提供)

影される．

荷電粒子を測定するために，10 組の各検出器の間と検出器の後方にプラスチック・シンチレータの平板を挿入した．シンチレータは荷電粒子が通過する際に光を発する，そして平行板の一端に取付けられた光電子増倍管は，荷電粒子が検出器を通過した後の数十ナノ秒（1 ナノ秒は千分の 1 マイクロ秒）後に，閃光を直ちに電気信号に変換する．これらの信号はスパーク・チェンバー内の交互の電極に高電圧を印加して，スパーク形成のもとになる電場を作る引き金となる．

スパーク・チェンバー槽の建設がこの実験チームが担当する唯一の仕事で



ブルックヘブンにおける最初の高エネルギー・ニュートリノ実験の特徴は，加速器から引き出された陽子が，ベリリウム標的を直撃する時に発生するパイ中間子の崩壊の中から，ニュートリノを選び出すことであった．13.5m 厚の大量の鉄の遮蔽壁によって，パイ中間子から生成されたミューオンや生き残ったパイ中間子が吸収される．その結果，ニュートリノだけが 10 トンのスパークチェンバーのところまで，侵入してくる．

あった．コーワンやライネスと同様に，彼らもまたニュートリノ以外の粒子が，実験を台無しにしてしまうことを回避する策を考えなければならなかった．1 つの方法は，検出器を高エネルギー粒子，特にミューオンが検出器内に侵入しないように，十分な物質で遮蔽することであった．ニュートリノを生成するパイ中間子・ビームは，約 20m の距離を飛行したあとに，13.5 m 厚の鉄の壁にぶつかる．パイ中間子のほぼ 10%が壁に到達する前に崩壊するはずである．そしてビームの残りの 90%は，崩壊によって作られたミューオンと同様，この壁の中で止まってしまう．そして，ニュートリノのみが壁の反対端から飛び出てくる．壁自体は古い軍艦の甲板部分の鉄板で作られていた．その当時，コロンビア大学のネービス研究所は米国海軍から予算を措置されていたので，廃材の金属を安く入手することができた．

しかし，この壁だけでは十分ではなかった．ニュートリノ以外の粒子の中には，この壁の障害物を通り抜け検出器の中に入ってくるものもあるだろう．

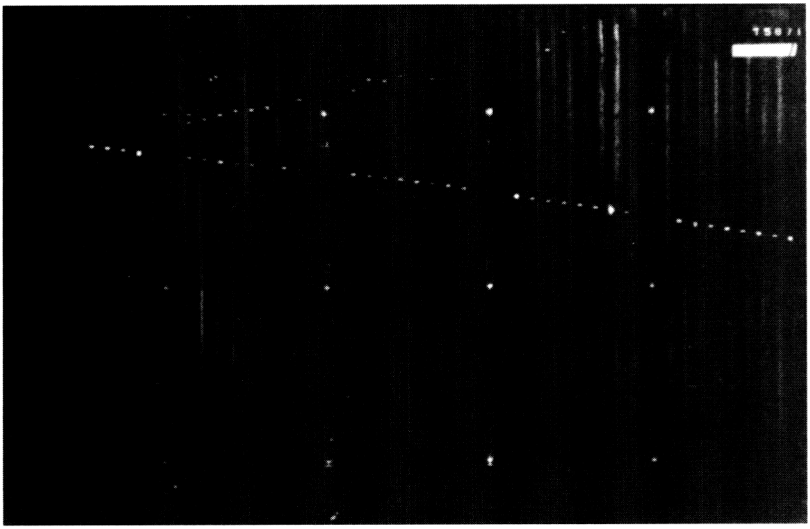
そのため，陽子加速器の電磁石に近接して並べられたシールド壁に沿って，さらに大量の鉄を置かなければならなかった．このことは，新しい加速器の責任者あったケネス・グリーンの指摘によるものであった．検出器の他の側面，すなわち床や屋根には，より遮蔽効果をあげるためにコンクリートが積まれた．

しかしながら，これでも毎秒数百もの宇宙線粒子がまだ検出器内に進入してくる，そして，これらの粒子はスパーク・チェンバーを作動させるシンチレータ板の中を通り抜ける．このような不必要な稼動を避けるために，実験チームは検出器の上面と，ビームに対して前面及び後面にもシンチレータ板を配置した（“Veto カウンター” と呼ばれている）．これらのシンチレータからの信号は，不必要な粒子（招かざる客）を識別し，スパーク・チェンバーの稼動をくい止めるために使用された．これによって宇宙線が引き起こす誤動作の数を，1 秒当たり 80 回まで減少させることができた．しかし，検出器の両脇はカメラによる飛跡撮影のために，空けておかなければならなかった．

招かざる客の数を減らす最後の工夫は，グリーンの指揮下にある加速器チームの腕前にゆだねられた．ニュートリノ反応によって作られる本物の飛跡は，陽子が加速器から取り出されて，ニュートリノ・ビームを作った後の非常に短い時間の中で生じる．そこで，研究者は加速器が陽子を蹴り出した間だけ，スパーク・チェンバーに電場を印加するような電子回路系を考案した．そして，陽子を取り出す時間間隔を最大限短くすることによって（1 パルス当たり 3.5 マイクロ秒），宇宙線が引き起こすチェンバーの偶発作動の回数を大幅に減らすことができた．

最終的にほぼ 8ヶ月にわたる実験期間の内の調子が良かった 25 日間で，加速器から 160 万パルスの陽子（1 パルス当たりの陽子数は約 2×10^{11}）が送られてきた．しかし，この期間内に検出器が作動した時間はわずか 5.6 秒（160 万パルス ×3.5 マイクロ秒）であり，この間に 440 個の宇宙線粒子がスパーク・チェンバーを作動したことになる．一方，10^{14} 個のニュートリノがこの時間内に検出器を通過し，実験チームは 25 反応事象が得られると予想した．

結果は 5000 枚の写真に記録された．この内の半分は反応事象が写ってなく，おそらく低速の中性子による反応で検出器が作動したものと考えられた．残りの写真は，“Veto カウンター” の隙間を通ってきた宇宙線粒子によると



直線状に長く走るミューオンの飛跡は，10 トンのスパークチェンバーを横切る瞬間に，アルミニウム板の間にできる短い放電の連なりとして，可視化される．写真中の上部に見える短い飛跡は，ミューオンを生成した同一のニュートリノ反応によって作られた他の粒子のものであろう．(ブルックヘブン国立研究所提供)

判断されたものが～400 枚，他の大部分は遮蔽壁を通り抜けたミューオンが，“Veto カウンター” に検知されずに検出器に進入したと見られるものであった．では，その他に残ったものは何を示すものなのか？ それらは確かに，ニュートリノが検出器の中で反応を起こしたことを示唆していた．調べるべきことは，どのような反応が起こり，それによって何が生成されたかである．

レーダーマン，シュタインバーガーと共同研究者達は，スパークチェンバーに残された粒子の飛跡からその種類を同定するために，ミューオンと電子が異なる質量をもっていることを大いに利用した．電子が物質中を通過すると，原子核が作る電場の影響で輻射を放出しながら急激にエネルギーを失う．そして，電子は原子と遭遇するたびに散乱され，よろよろとふらつき直ぐに止まってしまう．ミューオンはより重いため，常に容易には輻射を放出しない．このため，ミューオンの止まるまでの距離は，同じエネルギーを持つ電子よりもずっと長い．そして，進行方向をそらすことなく飛行し，真っ直ぐな飛跡を残す．

コロンビア大チームの最終解析結果の中に，特定の場所を発生源としない，典型的なミューオンを示す長い直線が写っている29枚の写真が残った．このことは，パイ中間子の崩壊によってミューオンとともに生まれたミュー・ニュートリノが，検出器の中でミューオンを生成したことを示すものであった．またミュー・ニュートリノは，電子も同様に生成することができるであろうか．電子は全く気まぐれな，ジグザグした飛跡を残すはずである．このことは，研究者達が当時まだ運転中であった3 GeV加速器，コスモトロンの電子ビームを，本実験で使用したスパークチェンバー2層を用いてテストし，確認済みであった．しかしながら，スパークチェンバー内の現象を示す写真の中には，全体として電子とおぼしき飛跡が数例あったものの，それ以上は確認できなかった．この数は29枚にはほど遠かった．一般的にはニュートリノ・ビームから電子が生成される数は，ミューオンと同等であることが予想されていた．研究者達はこの実験結果を説明するもっともらしい解釈として，“少なくとも2種類のニュートリノ，すなわち反応において電子と随伴するものと，ミューオンと随伴するものが存在する” と発表論文の中に書いた．

そして3番目が！

私は科学研究における古くからの言い伝えに従った：“理解できない現象は，その現象を示すもっと多くの事例を探すべきだ” [15]

マーチン・パール，1980

“電子らしさ” と “ミューオンらしさ” を保持する2種類の異なるニュートリノの発見は，素粒子物理学者がこれまでに構築してきた物質の究極像に，少なくともある種の対称性を持ち込むことになった．今や，素粒子には電子と電子・ニュートリノ，ミューオンとミュー・ニュートリノという明白な “家族” があるようだ．これらの粒子は，電磁相互作用やベータ崩壊を引き起こす弱い相互作用に関与し，原子核内で働く強い力を感じない．そして，全てが陽子や他の多くの粒子よりも明らかに軽いことから，総称してギリシャ語で “軽い，スリム” という意味を持つ “レプトン” と呼ばれるようになった．

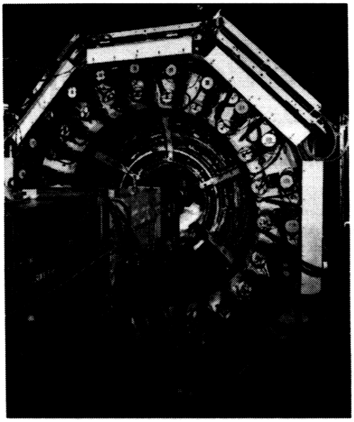
しかしながら，ミュー・ニュートリノの発見は，現存する数々の疑問に対

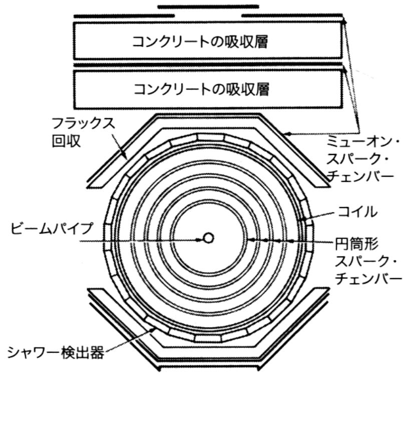
して回答を与えなかった．その疑問とは“歴史は繰返すか？”，“重い荷電粒子であるミューオンは，重いという性質以外は全て電子と同じ振る舞いをするのに，なぜ異なる粒子として存在するのか？”，そして“電子・ニュートリノよりも多分重いと考えられる，2番目の種類のニュートリノがなぜ存在するのか？”

これらの疑問に興味を抱いたのは，カリフォルニアにあるスタンフォード線形加速器センター（SLAC）のマーチン・パールであった．SLACは，長年に渡ってもっとも強力な電子加速器であり，世界でもっとも長い線形加速器（ライナック）を誇りとしていた．1972年の初めにこのライナックは，新しい任務を負うことになった．それは，“スタンフォード陽電子・電子非対称リング（最終設計ではただ1つのリングとなったが）”の略であるSPEARと呼ばれる加速器へ，ビームを供給することであった．

SPEARは基本的には電磁石の中をビームパイプが走るリングであり，ライナックから送られてきた1千億個の粒子を蓄積するように設計された．初めにライナックは，SPEARに時計周りに周回する電子を供給する．十分な個数の電子が溜まると，次にライナックは，SPEARの中を反対方向に走る陽電子の供給を開始する．陽電子と電子は，リングの正反対に位置する2箇所で衝突するように設計され，そこで対消滅を起こす．

1972年にSPEARが運転を開始した時には，SLACとローレンス・バークレイ研究所の実験チームは準備を完了し，ビームを持ち望んでいた．彼らは衝突点の1つに，MARK Iと名付けられたビームパイプを取囲む複雑な検出器を設置した．研究の目的は，電子と陽電子が対消滅するたびに開放されるエネルギーが，再度，物質化した際に生成される素粒子を検出することであった．円筒形のスパークチェンバーを同心円状に幾重にもの並べた多層チェンバーが，荷電粒子の飛跡を検出する．その背後には，アルミニウム製のコイルがチェンバーを取り巻き，荷電粒子の飛跡に曲率をもたせる磁場を供給する．さらにその外側には，プラスチック・シンチレータと鉛の層があり，ほとんどのガンマー線や電子がそこでエネルギーを使い果たす．最外層は鉄とコンクリートからできていて，ミューオンやニュートリノ以外の粒子をここで止めてしまう．そして，この層の上層にあるスパークチェンバーでミューオンを検出する．





MARK I 検出器．1974〜75 にスタンフォード線形加速器センターの SPEAR 衝突型加速器内に設置されて，数々の重要な発見をもたらした．右図の概念図は同心円状に積まれた円筒形の多層検出器群を示す．この検出器は電子と陽電子が正面衝突するビームパイプを取り囲むように組立られている．写真の左手にビームを衝突点に導く偏向電磁石が見える．（カリフォルニア大学ローレンス・バークレイ研究所提供）

SPEAR のような電子・陽電子衝突型加速器において，衝突によって生じる対消滅エネルギーは，種々の保存則を満たすように，再物質化する．例えば，新たに複数の粒子が生成された場合，その総電荷量は衝突前と同じ，つまり 0 でなければならない．また，粒子数と反粒子数は同等でなければならない．生成粒子の全質量エネルギーは，衝突する電子と陽電子の総エネルギーに等しい．この反応において，時には電子と陽電子，またはミューオンと反ミューオンが生成される．そこで，パールとマーク I の共同研究者達は，3 番目のさらに重い荷電レプトンが，反粒子を伴って生成されるであろうか，またもしそうであるなら，その反応をどのような方法で識別したらよいのか，考えを巡らした．

この新しいレプトンは相当重いに違いない．もしそうでなければ，すでに発見されているはずである．その重さは，ミューオンの十倍以上であると予想された．このことは，新レプトンが比較的軽いパイ中間子を含む，いろんな崩壊過程をもつことを示唆していた．すなわち新粒子の寿命は非常に短く，10^{-9} 秒以下であろう．そこで実験者にとって，新粒子の崩壊の際に生成され

る粒子の組成を調べることが，唯一の検出手段であった．

パイ中間子はいろんな反応過程で生成されるため，パイ中間子への崩壊だけから新粒子を特定することは難しい．しかしながら，レプトン族はより重い3番目の世代においても，同じ性質を持つと仮定すれば，新レプトンは単純に，ミューオンと反ミュー・ニュートリノ＋新ニュートリノ，または電子と反電子・ニュートリノ＋新ニュートリノへ崩壊することが可能になる．対消滅において同時に生成される新反レプトンも同様な崩壊の仕方をするであろう．そこで，パール達は，電子と反ミューオン（正電荷），または陽電子とミューオン（負電荷）が同時に出現し，痕跡を残さずに立ち去るニュートリノ以外，他にどんな粒子も伴わない反応例を探索することにした．ベータ崩壊の場合と同様に，これらの反応現象は，ニュートリノがエネルギーの大部分を持ち去るために，エネルギーが保存していないように見えるだろう．

1974年，最初の数例の反応事象が彼らにもたらされた．しかし，より多くの事象例を得ることと，第3番目のレプトンの崩壊を検出していることの確証を得るために，2年間に渡る注意深い解析期間が必要であった．パールは当時の様子を次のように語った：

私たちが実験を開始した時，重いレプトンが存在するかどうか定かではなかった．また，探索エネルギー領域がちょうど重いレプトンの質量に相当しているかどうか知らなかった．このため，この発見は私たちにとって大きな驚きであった．ましてや他の物理学者にとって，新しい荷電レプトンの発見はもっと驚嘆だったと思う．[16]

パールのチームは新しい粒子を，3番目を意味するギリシャ語の “triton” の頭文字から “タウ” と命名した．

その後の研究で，タウ粒子の存在は疑いないものになった．タウ粒子の質量は陽子の約2倍，すなわち電子の3,500倍，ミューオンの18倍，寿命は非常に短く 10^{-13} 秒である．では，タウ・ニュートリノ存在の仮説はどうなのか？ 確かにタウ粒子には，数個のパイ中間子とともにニュートリノ1個を放出する崩壊が可能である．このニュートリノは電子・ニュートリノやミュー・ニュートリノと本質的に違うものか？ つまり，タウ粒子らしさ “tau-ness” を保有するのか？

私たちは今のところ確かなことを知らないというのが答えである．物理学

者は第3のニュートリノ実験を行わなければならない．すなわち，タウ粒子の崩壊で生まれたニュートリノがミューオンや電子ではなく，タウ粒子のみを生成することを確認する実験である[注1]．素粒子間の電磁相互作用や弱い相互作用を矛盾なく記述する電磁弱理論は，タウ・ニュートリノを理論の枠組みに取入れている．そのため，電磁弱理論の成功は，タウ・ニュートリノの存在を支持する強い状況証拠を提供する．さらに，この章のあとでわかるように，1989年に，新しい結果がもたらされた．自然は3種類より多くもなく，少なくもない質量の軽いニュートリノを要求しているようである．

ニュートリノの質量を測る—パート II

各々のニュートリノの質量が，対応する荷電レプトンの質量とほぼ同じ相関を持つと推測することは自然である.[17]

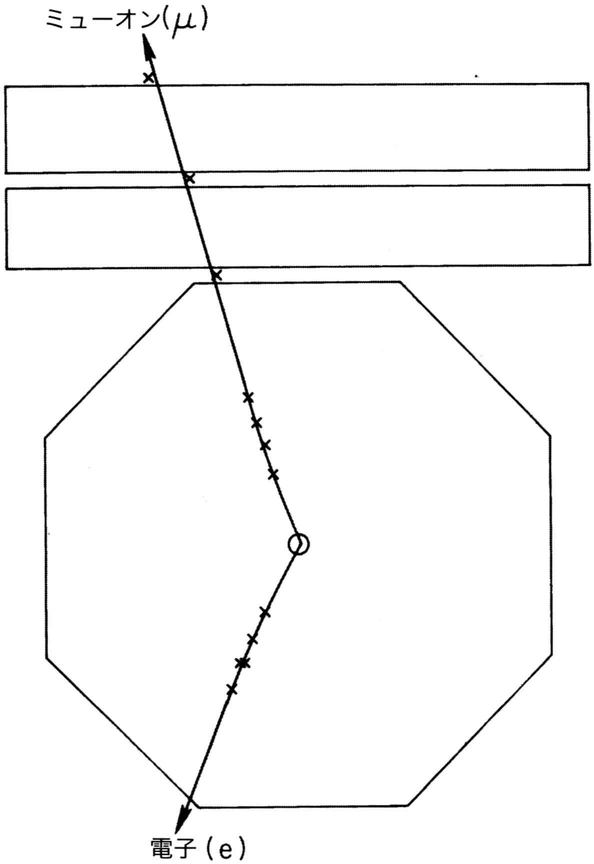
スティーブン・ワインバーグ，1986

3個の荷電レプトンの質量は，電子＝ 0.511 MeV，ミューオン＝ 105 MeV，タウ粒子＝ 1784 MeV のように著しくかけ離れている．私たちは電子・ニュートリノの質量が，もしゼロでないなら，ほとんど疑いなく数 eV を越えないくらい小さいということを知っている.（第3章で述べたトリチムのベータ崩壊において測定されるニュートリノがこれである.）しかし，ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノの質量はどうであろうか？ それらは対応する荷電レプトン（ミューオンやタウ粒子）の質量よりはずっと小さいとはいえ，電子・ニュートリノよりも大きな質量を持つのだろうか？

チューリッヒにあるスイス原子核研究所（SIN：現在のポール・シェラー研究所）のチームは，これまで以上に精密なミュー・ニュートリノの質量測定を行った．この実験の原理は簡単であるが，要求される精度を得ることは非常に難しい．

実験の方法は，実験室系において静止している荷電パイ中間子の崩壊を観

注1 1999 年米国フェルミ研究所で実施された名古屋大学を中心とする DONUT 実験によって，ニュートリノ・ビーム中に置かれた原子核乾板で生成する粒子を測定して，タウ・ニュートリノの存在が確認された．



Mark I 検出器で見つかった，ミューオンと電子の飛跡のみが測定された事象．この事象は，3番目の種類のレプトンが崩壊したことを示す．電子と陽電子が検出器の中央部で対消滅して生成されたタウ粒子と反タウ粒子は，一方が，ミューオンと2個のニュートリノに，他方が，電子と2個のニュートリノに崩壊している．ニュートリノは痕跡を残さないため測定できない．(SLAC 提供)

測することである．パイ中間子はミューオンとミュー・ニュートリノの2個の粒子に崩壊する．ここで，2個の粒子の全エネルギーはパイ中間子の質量に等しく，運動量の大きさは同じで，正反対方向に運動する．私たちはミューオンとパイ中間子の質量を知っているので，ミュー・ニュートリノの質量が

ゼロなら，ミューオンの運動量がいくらであるか計算できる．測定された運動量がこの計算値からわずかでもずれていれば，これはニュートリノの質量を反映していることになる．

実験の難しさは，パイ中間子の崩壊において開放されるエネルギーが比較的大きいことにある．荷電パイ中間子はミューオンよりも 34 MeV 重い．そこで，もしニュートリノの質量をゼロと仮定するとミューオンの運動量は同じ単位で表すとほぼ 30 MeV である．SIN のチームはミューオンの運動量を 0.0028%の高精度で測定することに成功した．そしてこの精度内で運動量の測定値は，ニュートリノの質量をゼロと仮定した時の計算値と一致していることを示した．

しかし，多分読者は驚かれると思うが，このことはニュートリノの質量をゼロと言い切ることができない．例えば，ニュートリノが 0.25 MeV の質量を持つとすると，ミューオンの運動量の計算値は 30 MeV から 0.00082 MeV だけ変化する，すなわちミューオンの運動量の 0.0028%となる．言い換えれば，測定誤差と等しい．このことから，実験結果は，ミュー・ニュートリノの質量が 67%の信頼度で 0.25 MeV 以下であることを示している．この値は電子・ニュートリノに対する質量上限値に比べてずっと大きく，ミューオン自身の質量よりもはるかに小さい．この結果は，ニュートリノの質量が荷電レプトンよりも非常に軽いという描像とよく一致する．

質量を測定する難しさは，タウ・ニュートリノではもっと深刻になる．タウ粒子と他の粒子（ミューオンやパイ中間子など）との間の質量の違いは，1600 MeV もあり非常に大きい．もっとも精度の良い結果は，タウ粒子がタウ・ニュートリノと 5 個の荷電パイ中間子（負荷電タウ粒子の場合は 2 個の正荷電パイ中間子と 3 個の負荷電パイ中間子）に崩壊する事象の検出から得られた．ここで，5 個のパイ中間子は，あたかもタウ粒子に近い質量を持つ 1 個の粒子のように扱われる．

この解析手法は，ハンブルグにあるドイツ電子シンクロトロン研究所（DESY）の実験装置，ARGUS の研究チームによって開発された．ARGUS 装置は，DORIS II として知られている電子・陽電子蓄積リングに設置されている．リングは SPEAR と同じものであるが，10 GeV 近辺の全衝突エネルギーで運転している．実験装置自身もタウ粒子を発見した MARK I と似ているが，よ

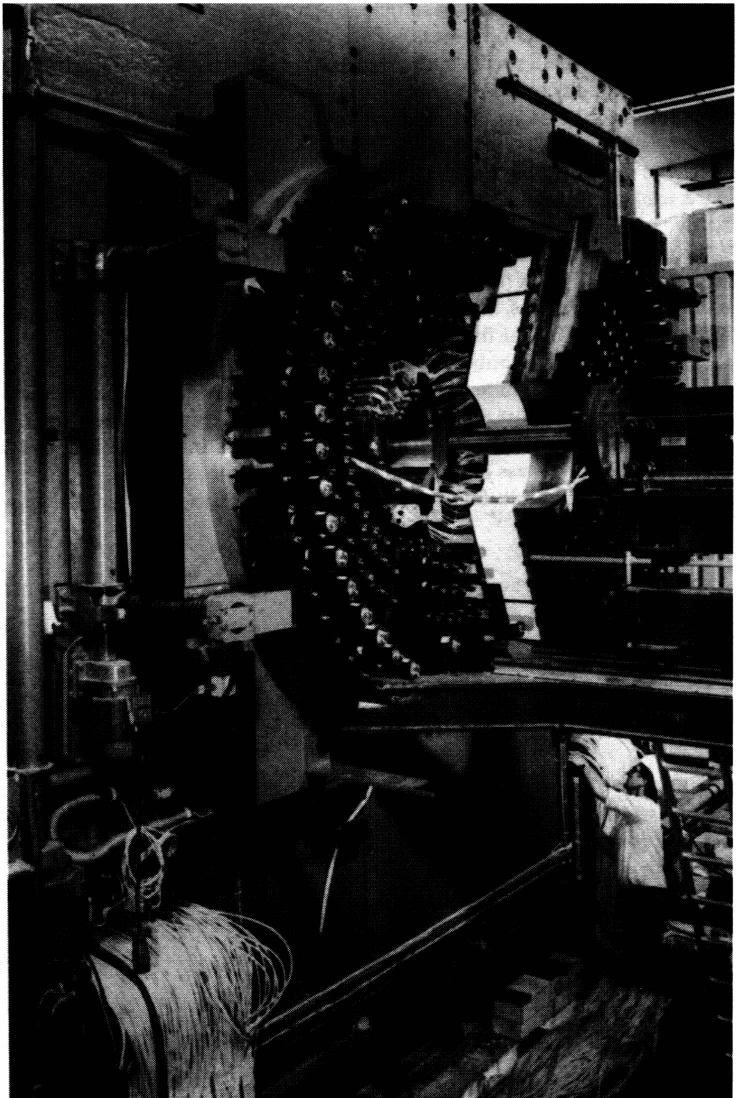
り最新の技術を取入れ，対消滅によって生成される粒子を検出し，測定する高精度実験装置である

DORIS における電子・陽電子衝突では，タウ粒子と反タウ粒子を対生成することができる．この実験でタウ・ニュートリノの質量を測定するために，ARGUS チームはタウ粒子が 5 個の荷電パイ中間子とニュートリノに崩壊し，一方の反タウ粒子がもっとも単純な崩壊過程である荷電粒子 1 個とニュートリノに崩壊する現象を探索した．このような崩壊現象は稀であり，10,000 個のタウ粒子の崩壊中，わずか 5 回の頻度で起こる．1983 年から 1986 年の間に蓄積された電子・陽電子消滅反応によって，数個のパイ中間子が生成されている 2 百万事例の中から，ARGUS チームは，タウ粒子が 5 個の荷電パイ中間子に崩壊する際に要求される全ての反応条件を満足する 11 例の現象を検出した．この僅かな事例数でも，タウ・ニュートリノ質量の上限値に大きな制限を与えることができた．

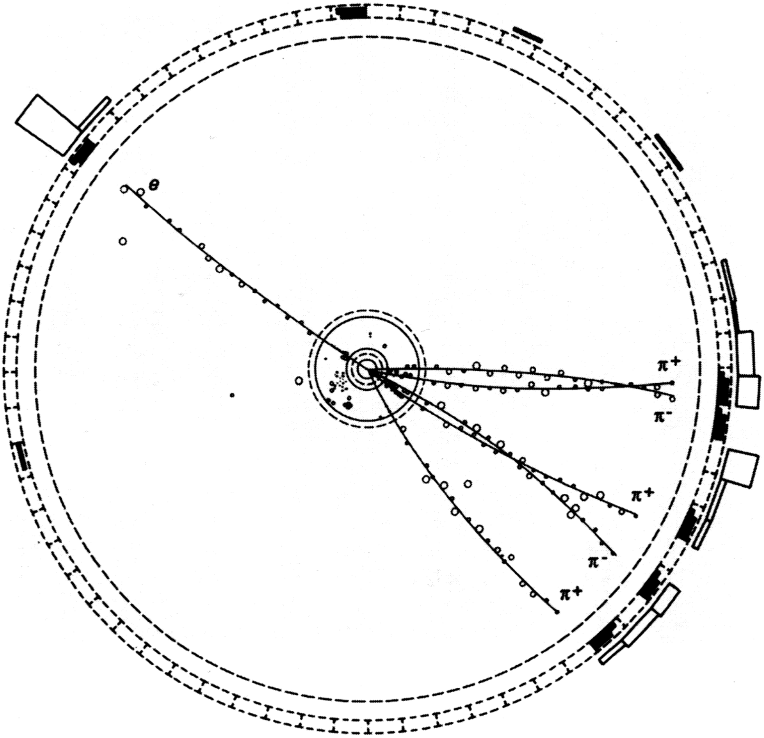
これらの 11 例のそれぞれに対して，タウ粒子崩壊における 5 個の荷電粒子の運動量を測定し，パイ中間子系の全運動量と全エネルギーを求めた．ある単位系（自然単位系）を採用すると（質量）^{2} = (エネルギー)^2 − (運動量)^2 で与えられるため，5 個のパイ中間子系をあたかも 1 個の粒子とみなすことによってその質量が計算できる．

5 パイ中間子系の質量がタウ粒子の質量（最大質量）に近い値を持つ事象数は，タウ・ニュートリノの質量を敏感に反映することになる．ARGUS で検出された 11 事象のうちの 2 事象において，5 パイ中間子系の質量がタウ粒子の質量に非常に近接していた．計算による予測数と検出数を比較することによって，研究者達は 95%の信頼度で，タウ・ニュートリノの質量が 35 MeV 以下であると結論した．この値は，再び電子・ニュートリノの質量上限値と比べてはるかに大きいが，対応する荷電レプトンであるタウ粒子の質量よりは小さい．

この種の事象数をもっと多く集めるだけでなく，タウ粒子自身の質量の測定精度を改善することによって，タウ・ニュートリノの質量の上限値をさらに下げることができるだろう．タウ粒子の質量の値は，測定データとの比較に必要な 5 パイ中間子系の質量分布を計算する際の，不確定要素の根源である．タウ・ニュートリノ質量の上限値を 10 MeV 以下の精度で求める実験は，



ハンブルグにある DESY 研究所の ARGUS 検出器．この検出器の実験チームは，もっとも精度の高い，タウ・ニュートリノの質量測定を行なった．(DESY 提供)



ARGUS 検出器で見つかったこの粒子群は，電子と陽電子が検出器の中央部で対消滅して発生した，タウ粒子と反タウ粒子の崩壊によるものである．ここで，反タウ粒子は 1 個の反タウ・ニュートリノと 5 個のパイ中間子に崩壊し，一方，タウ粒子は電子と反電子・ニュートリノ，タウ・ニュートリノに崩壊している．ARGUS グループは 5 個のパイ中間子の有効質量の測定から，タウ・ニュートリノの質量が 35 MeV 以下であることをつきとめた．(DESY 提供)

タウ－チャーム・ファクトリで実現されるであろう．タウ－チャーム・ファクトリとは，大量のタウ粒子やタウ粒子と同程度の質量を持ち，チャーム・クォークを含む粒子群を生成するように設計された大強度電子・陽電子衝突装置のことである．このような実験施設は，広範囲の高精度実験を可能にすることから，幾つかのグループの物理学者によって提案されているが，これまでのところどの国も，またどの研究機関も実験施設の建設を承認していな

い[注2].

振動するニュートリノ

私たちはニュートリノが質量を持っているかどうか知らない．また，もしニュートリノが質量を持つなら，それがマヨラナ粒子なのかディラック粒子なのかもわからない．さらに，これらのニュートリノがフレーバー（異なる種類）間の振動（転換）を起こすのかどうかもわからない．要するに，ニュートリノについて知らないことだらけなのだ．[18]

ジェルミー・バーンスタイン，1984

モーリス・ゴールドハーバーはかって，“ニュートリノは理論家に勇気を注ぎ，実験家に忍耐力を強要する”と述べている．[19] ニュートリノは確かに研究者に満足感を与えなかった．ニュートリノ研究の歴史をさかのぼると，しばしば以下のような思いに突き当たる：私たちの知識の範囲ですべてうまくいっていると思っていた時に，誰かがやって来て足元からじゅうたん（知識の基盤）を引き剥がす．そのため，私たちが知っていると思っていたことが何だったのか，私たちがそう思うということは何を知ることなのかを疑い始める．ルイス・キャロル（不思議の国のアリスの著者）にとってニュートリノは格好の題材であろう．

結局は，ニュートリノについてほとんど何もわかっていない．そして，何もわかっていないということは，それを調べることの難しさを暗に示している．ニュートリノに対する疑問のいくつかは，数少ない事実の 1 つである中性電荷に起因している．このことは，ニュートリノがそれ自身の反粒子と同等であるか(第 3 章参照)，という疑問を提起する．また，ある種のニュートリノが他の種類のニュートリノに転換する，ニュートリノ振動として知られている現象を可能にする．言い換えれば，私たちが電子・ニュートリノ，ミュー・ニュートリノ，タウ・ニュートリノと呼んでいる粒子は，本来それぞれ独立の基本粒子であるのか，という疑問が生じる．

注2 ようやく 2006 年に中国の高能物理学研究所の電子・陽電子衝突型加速器 BEPC-II が完成し，タウ－チャーム・ファクトリの実験が可能になった．現在 2007 年の総合運転の開始を目指して調整が行われている．

粒子が異なる粒子状態の間を行き来する振動現象の考えは，1950年代半ばのケイ中間子の研究にさかのぼる．ケイ中間子とは1940年代の後半に，宇宙線の相互作用の中で初めて発見された粒子である．1953年に，新しく発見された数々の素粒子の分類体系を調べていた理論物理学者のマレイ・ゲルマンは，中性K^0中間子とその反粒子の$\bar{K}^0$を2つの異なる粒子として表した．このゲルマンの理論に対してエンリコ・フェルミは，中性粒子とその反粒子をどのようにして区別するのか，と疑問を投げかけた．K^0と$\bar{K}^0$はともに電荷保存により，正，負荷電のパイ中間子対に崩壊する．そこで，もし，この崩壊を検出した時に，これらの粒子がK^0または$\bar{K}^0$のどちらが親であるかを，どのようにして知ることができるのか？ 既に十分に知り尽くされた粒子と思われた中性K-中間子の信憑性が危うくなってきた．

この疑問に対する解答を探していたゲルマンと理論家のアブラハム・パイスは，びっくり仰天するような新しいアイディアを思いついた．この考えは余りに唐突なため，1954年7月のグラスゴー国際会議で発表することを差し控えたほどであった．[20] 問題に対する解決の鍵は，私たちが観測する粒子がK^0と$\bar{K}^0$の2粒子の混合状態であることを定式化することにあった．この現象を記述するためゲルマンとパイスは，よく知られている量子力学の原理である重畳原理を採用した．彼らはK^0と$\bar{K}^0$に対する量子力学的表現を，2通りに重ね合わせる方法を用いて結合させた．その結果，この2つの量子状態は明らかに異なった寿命を持つ状態に対応した．一方の状態は，すでに観測されているような2個のパイ中間子に崩壊することが可能である．また，他方は3個のパイ中間子に崩壊し，より長い寿命を持つ．この長寿命は，2個よりも3個の粒子を生成することが難しいことから推察される．

パイスとゲルマンは，K^0と$\bar{K}^0$が異なる質量を持つ基本粒子状態であるが，その線形結合状態の異なる寿命を持つ状態が，観測されている粒子に対応しなければならないと考えた．2年後の1956年に，レオン・レーダーマンと彼が率いる実験チームが，ブルックヘブン国立研究所で中性K中間子の3パイ中間子への崩壊を初めて観測し，K_{Short}に対してK_{Long}として今日知られている長寿命の粒子の存在が確認された

ゲルマンやパイスの研究に刺激されてドゥブナ研究所のブルーノ・ポンテコルボは，もう1つの中性粒子であるニュートリノの量子力学的混合の可能性

を検討し始めた．1957年に彼はまず，ニュートリノと反ニュートリノ混合を議論した．そして，その10年後に粒子・反粒子混合ではなく，電子・ニュートリノがミュー・ニュートリノに転換（または，その逆）するような混合を議論した．しかし，この考えは1962年にすでに，牧二郎と名古屋大学，および片山泰久と京都大学の研究者達が提案していた．

ニュートリノ混合の背景にある基本概念は，弱い相互作用に関与する粒子状態が，その粒子の固有の質量状態が存在するなら，それと同一ではない点にある．つまり，私たちが電子・ニュートリノ，ミュー・ニュートリノ，タウ・ニュートリノと呼んでいる粒子状態である弱い相互作用の状態は，それぞれ固有の質量状態の混合状態である．もしそうであるなら，例えばあるエネルギーの電子・ニュートリノが生成されると，異なる質量状態はそれぞれ異なる速さで空間を伝播していく．粒子が走行する時，質量状態は互いに位相を異にし，混合は時間とともに変化する．

このようにして，私たちが電子・ニュートリノと呼んでいる粒子に対応する最初の混合は，ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノに対応する混合へと進行する．すなわち，電子・ニュートリノのみから構成された粒子ビームは，出発からある時間後にミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノを含むようになる．異なる種類のニュートリノの混合割合は，いくつかのパラメータ，すなわちエネルギー，ビーム発生源からの距離，さらに重要な質量の2乗差に依存する．

ニュートリノは電気的に中性であるため，ニュートリノ振動は電荷を保存する．その上，レプトン数も同じに保たれる．起こりうることは，ニュートリノの種類（フレーバー）が変わることだけである．しかし，自然はこのような転換を許すだろうか？ その答えを私たちは知らない（第1章の注2参照）．

電磁相互作用と弱い相互作用を統一する電磁弱理論は，レプトンが常に同じフレーバーを保持することを要求する．それは，“2ニュートリノ実験”においてミュー・ニュートリノが“ミューらしさ＝ミュー・フレーバー”を保存してミューオンのみ生成したように，このフレーバー保存則を確かめるには実験をおいて他にない．しかしながら，もっとも簡潔な枠組みの中での電磁弱理論は，ニュートリノが質量を持つことを認めないためニュートリノ振動の可能性を排除する．

電磁弱理論をいくぶん変更することによって，ニュートリノに非常に小さな質量を導入することは可能であるが，しかし，このようなその場限りの方法では，ニュートリノの質量の大きさを説明することができない．そのため，ニュートリノ振動が起これば，電磁弱理論の範疇からはずれた新現象の証拠になるであろう．電磁気力や弱い力の統一と同じ数学的手法を用いて，強い力をも取込むことを目指す“大統一理論”の試みは，非常に微弱ではあるが，レプトン間のフレーバー転換反応を引き起こすものもある．

大統一理論の魅力は，1980年代に起こったニュートリノ振動に対する関心の高まりに，1つの根拠を与えることであった．さらに，電子・ニュートリノが太陽と地球の間でフレーバーを転換するとしたら，地球に到達する数が明らかに減少すること（太陽ニュートリノ欠損現象：第6章）を説明できるかもしれない．第3の根拠は，ニュートリノ質量の直接測定よりもはるかに小さな質量によって引起されるニュートリノ振動が，観測できるようになってきたことによる．

ニュートリノ振動の探索には，2つの基本的な実験的手法がある．それらはニュートリノのフレーバーが“消失する（disappearance）”現象と，“出現する（appearance）”現象を検出する方法である．典型的な“消失”実験は，原子炉内で生成された反電子・ニュートリノを，逆ベータ崩壊反応によって検出することである．もし，予想数より少ない反電子・ニュートリノ反応が検出されれば，反電子・ニュートリノの一部が原子炉と検出器の間で，ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノに転換した有力な証拠になる．その他，加速器を用いてミュー・ニュートリノを生成し，反応数の減少を検出する実験も可能である．理想的には両方とも，ニュートリノ振動が距離とともに周期的に変動するため，ニュートリノ発生源から2箇所以上の異なる距離で実験を行うべきである．さらにこの方法では，例えば特定のエネルギーを持つニュートリノ数を検出する場合の実験上の多くの不確定要因が，異なった場所での結果を比較することによって相殺されることになる．

“出現”実験は，ニュートリノのエネルギーが対応するフレーバーの荷電レプトンを生成するのに十分である場合にのみ可能である．例えば，原子炉からのニュートリノを用いてミューオン生成を検出することは，電子・ニュートリノがたとえミュー・ニュートリノに転換したとしても，ミューオンを作

るに十分なエネルギーがないため不可能であろう．このため，“出現”実験は，宇宙線による高エネルギー反応で生成されたミュー・ニュートリノを用いることが考えられるが，一般的には粒子加速器による研究が中心になる．

このような実験から何が得られたのか？ 時折，ニュートリノのフレーバー変換を示唆する新聞の大見出しがあったとはいえ，“消失”実験や“出現”実験において，ニュートリノ振動は検出されなかったというのが一般的認識である．しかし，このことはニュートリノ振動の可能性がないと言っているのではない．それどころか 1990 年には第 6 章で紹介するように，太陽からやって来るニュートリノの検出実験においてニュートリノ振動が示唆され，さらに他ならぬ実験室における原子核のベータ崩壊実験でも新たな兆候がでた．

10 年前の 1980 年にサヴァンナリバー原子炉を用いて研究をしていたフレッド・ライネスと共同研究者達は，データ解析の結果，ニュートリノ振動の兆候を検出したと発表した．しかし，その後のいろんな原子炉で行なわれた追試実験からは，その兆候は確認されなかった．数ヶ月後に，原子核ベータ崩壊の測定から，ニュートリノ振動の証拠を検出する方法について提案した 2 編の論文が，“フィジックス・レター誌”に掲載された．フェルミがその昔の 1934 年に示したように，ベータ崩壊の際に放出される電子が示すエネルギー分布の高エネルギー先端部分の形は，同時に放出されるニュートリノの質量に依存する．そこで，もし電子・ニュートリノが質量の混合状態なら，電子のエネルギー分布は関連する質量状態に対応して，異なる分布が混じり合っているはずである．以上の効果は電子のエネルギー分布に変形をもたらす．そして，混合割合が数%程度の場合，この変形は観測可能である．

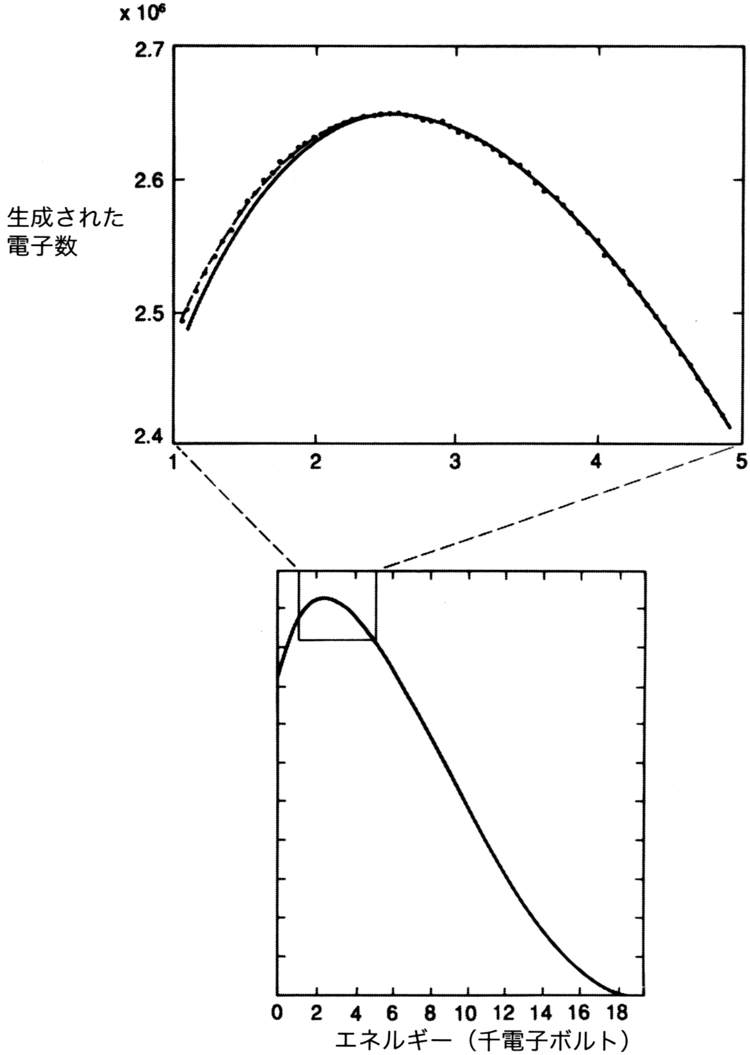
カナダのオンタリオにあるグエルフ大学の J.J. シンプソンは，この考えに大いに刺戟を受け，トリチウムの崩壊による電子のエネルギー分布を詳細に調べる研究に着手した．彼はすでにこの分野で著名な研究者として認められていた．最初の実験では，ニュートリノ混合の証拠は検出されなかった．しかし，その後，検出器の電子回路系を改良したところ，1.5 keV 付近のエネルギー以下でエネルギー分布が，理論予想値からずれている形跡を見つけた．分布の先端エネルギーの値が 18.6 keV であるため，このデータはこれまで議論してきた電子・ニュートリノよりは重い，17.1 keV の質量を持つニュートリノ（重いニュートリノ）の放出を示唆するものであった．データを説明す

るために必要な混合量は，約3%であった.

1985年4月に公表されたシンプソンの結果は，大きな衝撃を与えた．理論物理学者は，自分の理論の中に17 keV ニュートリノが許容できるかどうかを徹底的に調べた．また，実験グループはもっと証拠を得ようと，実験を行なった．しかし，時間の経過とともに，他のグループの実験から混乱を引起すような結果が得られた．17 keV ニュートリノ探索の手法の一つとして，別の原子核のベータ崩壊を測定するグループがいた．この手法は，17 keV ニュートリノとの混合が起こっているとすれば，全てのベータ崩壊で同じ結果が得られることに基づいている．主に検討を要することは，エネルギー先端部分の計測と同じく，今着目しているエネルギー領域で十分な崩壊数（事象数）を提供する原子核を探すことであった．その結果，質量数35の硫黄（硫黄35）が最もこの研究に適していることが判り，多くの実験が行なわれた．しかし，ほとんどの実験データは，ニュートリノ混合に否定的であった．一方，シンプソンは彼の学生のアンドリュー・ハイムと一緒に，さらに改善された実験装置でトリチウムと硫黄35の実験を行い，双方からより確実なニュートリノ混合の証拠を検出した．これが混乱の元凶であった．

複数の実験から矛盾する結果が出てきたことは，多くの物理学者に17 keV ニュートリノの興味を失わせることになった．しかし，1990年後半に2つの新しい実験が確認の報告を行った．その1つは，オックスフォード大学に移ったハイムとニック・ジェリーが，シンプソンと同型のエネルギー分析装置を改良して行った，硫黄35の実験であった．彼らは，ほぼ1%程度の17 keV ニュートリノ混合に相当するエネルギー分布の変形を再び検出した．一方で，カリフォルニアにあるローレンス・バークレイ研究所のエリック・ノーマンと彼のチームは，炭素13のベータ崩壊を研究していた．そして，彼らはハイムとジェリーの実験と同程度のデータを蓄積して，17 keV ニュートリノの証拠を見つけた．さらに，ハイムとジェリーは1991年秋までに，他の原子核，ニッケル63のベータ崩壊実験においても証拠を得た．

これら全ての結果は，伝統的に懐疑深い素粒子物理学者集団を充分に確信させることができないにしても，17 keV ニュートリノの可能性に関心を呼び戻すには十分であった．しかし実際は逆で，新しい結果は様相眺めの状況をもたらした．理論家が17 keV ニュートリノを理論の枠組みに加えようと四



トリチウムのベータ崩壊で生成された電子のエネルギー分布．低エネルギー領域での盛り上がりは，グエルフ大学の J.J. シンプソンが発見した現象である．図中の実線は，理論から予測される分布を示す．17 keV 以下のエネルギー領域で，データはこの曲線からわずかにずれている．シンプソンは，トリチウムが 17 keV の質量を持つニュートリノを，全体の 3%の割合で放出すると仮定すれば，このゆがみは説明できることを示した．(フィジカル・レビュー・レター誌 1985 年 54 巻 1891 ページ)

苦八苦している間，大部分の物理学者はさらなる確証を待ち望んだ．特に第3章のトリチウム・ベータ崩壊によるニュートリノ質量の測定で紹介したような，磁気エネルギー分析器を使用した研究は，17 keV ニュートリノの証拠を検出することができなかった．シンプソンとハイム，ジェリーは，磁気エネルギー分析器を使用していなかった．しかし，彼らは，磁気エネルギー分析器を十分に理解していないことに起因する実験的な効果や，重いニュートリノの兆候を覆い隠すような効果があると主張した．しかしながら，17 keV ニュートリノの存在は，全く異なる手法の実験において，さらにいろんな原子核から明らかな証拠が検出されるなら，その事実は定着するであろう．そして，それは電磁弱統一理論の範囲を越えた素粒子物理学を認知させる，大発見の1つになるだろう[注3]．

ニュートリノの種類を数える

地上の実験で，質量を持たないニュートリノの種類の総数を測定することは，きわめて難しい．しばらくの間，もっとも精度の良い実験結果でも，その上限値は6000であった[注4]．[21]

フランシス・ハルツェン，K．ムシュラ，1983

1，2，3，...ニュートリノのフレーバー，つまり種類は一体幾つなのだろう？ ここでも，素粒子理論は私たちのニュートリノに関する疑問に対して，手助けとなる明確な指針を与えてくれない．理論家の裁量の範囲は，現時点では“標準理論”として知られるようになった理論を駆使することのみであった．この理論は2つの部分から構成されている．それらは弱い相互作用と電磁相互作用を扱う電磁弱理論と，それと独立にクォーク間に働く強い相互作用を扱う量子色力学と呼ばれる理論である．

標準理論によれば，基本粒子であるレプトンとクォークは同じ粒子対関係を持っている．例えば，電子の対の相手は電子ニュートリノ，ミューオンはミュー・ニュートリノ，タウ粒子はタウ・ニュートリノである．同様の関係

注3 その後の磁気分析器を用いた追試実験により，17 keV ニュートリノの存在は否定された．

注4 K 中間子→ π 中間子＋ニュートリノ＋反ニュートリノ崩壊が検出されないことから求めた値．

はアップとダウン，チャームとストレンジのように，よく知られている 4 種類のクォークにも存在する．その上，この理論は十分有効であると検証されているので，多くの物理学者はボトム・クォークと対をなす 6 番目のクォーク（トップ）の存在と，その発見は時間の問題であることを堅く信じている（第 1 章の注 1 参照）．このように，それぞれのレプトン対には，順に重い質量を持つクォーク対が対応している．ここで各対は，それぞれの粒子族（“レプトン家族”と“クォーク家族”）の中の一世代を構成する

この繰り返しパターンは，各家族につき 3 世代で終わるのだろうか？ もっと世代が存在するのだろうか？ 標準理論はこの議論をはぐらかそうとする：すなわち，世代数が多くはないという一般的な理由を示してくれるが，それ以上に何も答えてくれない．そしてまた，これまでの素粒子実験もこの疑問に対して，理論よりもさらに役に立たなかった．もっとも信頼できる指摘は，宇宙初期の物質形成に関する宇宙論的解釈からもたらされた．第 7 章でより詳しく述べるが，現在の宇宙観測で得られた 2 つの軽い元素，ヘリウムと水素の相対的な割合は，軽い（または質量 0）のニュートリノが 4 世代以上存在しないことを示す．ところが 1989 年秋に事態は一変し，ニュートリノは 3 世代である，つまりタウ・ニュートリノが限度であるという，決定的な実験データが得られた．

1970 年代中頃のタウ粒子の発見以来，素粒子物理学をじらし続けたこの疑問の答えは，レプトン族やクォーク族ではなく，第 3 の粒子族である力の媒介粒子の中の Z^0（一般に，欧州では“ゼッドノート”，米国では“ジーゼロ”と発音される）が運んできた．Z^0 は陽子の 100 倍近い質量を持つ，重い光子のような粒子である．ちょうど光子が荷電粒子の間を，“量子キャッチボール”ゲームのように行き来して電磁気力を媒介するのと同じく，Z^0 は第 5 章で紹介するように粒子間に働く弱い力の担い手である．

Z^0 が標準理論の基本的枠組みの一つである，電磁気力と弱い力を統合する電磁弱理論の中の主役であることは，疑う余地もない．この粒子は，最終決着となった 1983 年の直接測定に遡ること 10 年以上も前から，理論によって予言されていた．実験家は Z^0 の性質を詳細に調べることによって，標準理論を越える新理論のかすかな手がかりを見つけ出すことを夢見た．新理論とはより包括的な理論で，標準理論に潜む幾つかの未解決問題に解答を与える

ような理論である．しかしながら，Z^0 は他の粒子に比べてあまりにも重いため，1989 年以前に実験によって検出された Z^0 事象の数は，わずか 50 個であった．それが 1989 年夏の後半には，3 箇所の研究所から大量の Z^0 粒子事象に基づく実験結果が出はじめた．

カリフォルニアのスタンフォード線形加速器センターでは，20 年前に建設された電子加速器の大胆，かつ工夫に富んだ改良が功を奏して，1989 年の夏の間に，500 個の Z^0 粒子の生成に成功した．この改良によって加速器は電子のみならず，陽電子も 50 GeV のエネルギーまで加速することが可能になった．電子と陽電子は，線形加速器の最終端で分岐して，円弧状に並べられた磁石の中を二手方向に走行し，周回運動の後に再び出会って正面衝突する．この衝突によって衝突系の全エネルギーは 100 GeV に達し，重い Z^0 粒子を生成するには十分なエネルギーとなる．1989 年 7 月，同じくアメリカの研究機関でイリノイ州にあるフェルミ国立加速器研究所の物理学者は，約 500 個の Z^0 粒子の崩壊を解析したことを報告した．この Z^0 は，900 GeV まで陽子，反陽子ビームを加速できるフェルミ研の円形加速器（テバトロン）で加速された，陽子と反陽子の高エネルギー衝突によって作られたものである．しかし，2 箇所のアメリカ研究機関におけるこの成果は，Z^0 生成に的を絞って設計された“Z^0 製造工場”の新しい加速器によってたちどころに覆い消されてしまった．

欧州共同原子核研究機関；CERN（セルン）はジュネーブの少し北側にあり，フランスとスイスの国境をまたいで位置している．1950 年代に稼動を開始した CERN は，陽子加速器による研究が中心であった．しかし，1980 年代初めに，LEP（大型電子・陽電子衝突装置）と名付けられた新しい巨大加速器の建設を決定した．LEP は，1980 年代にタウ粒子やチャーム・クォークを持ついくつかの新粒子を発見するなど，SPEAR で初めて有効性が実証された電子・陽電子衝突装置の性能を，実現可能の限界をきわめるように設計された．また，一方で“Z^0 製造工場”を目指して設計された．

電子と陽電子が対消滅すると，これらの粒子のエネルギーは基本的な保存則を満たす条件のもとで，いろんな種類の粒子を生成して再び物質に転化する．生成された粒子の総電荷はゼロ，全エネルギーは消滅した電子・陽電子対の合計エネルギーを越えてはならない．経験則によれば全（レプトン数−

反レプトン数)，全(クォーク数－反クォーク数)もまた消滅前の状態と等しく，ゼロでなければならない．この最後の条件は，粒子と反粒子は一般的には対生成されることを意味する．しかしながら，Z^0 はクォークでもレプトンでもなく，さらに電気的に中性である．以上のことから，電子と陽電子は Z^0 の質量を生み出すのに必要な 90 GeV 以上のエネルギーを持っていれば，消滅によって 1 個の Z^0 粒子を生成できることを意味する．

LEP の第一期計画では，電子と陽電子が最高 100 GeV の全エネルギーで衝突するように設計された．このエネルギーは Z^0 製造工場を作るのに十分である．この計画の実現するために，加速器の大きさは前例のないような規模となった．CERN から出てジュラ山脈の裾野を通って戻ってくる周長 27 km の地下トンネル内に，この円周上に磁石を並べた加速器が建設された．このように巨大なサイズの円周長は，高エネルギー電子や陽電子が曲率を持つ軌道を走行する時に，容易にエネルギーを放射するために必要となる．そこでエネルギー損失を最小限に抑えるには，円弧にできるだけゆるやかな曲がりを持たせなければならない．

LEP の建設の成功は，ありとあらゆる種類の，その中でも特に，土木，電気，電子工学の並外れた技術の進歩・革新によってもたらされた．同じことが電子と陽電子が衝突する 4 箇所に配置された，対消滅反応を検出する巨大測定器に対しても言える．それぞれの測定器は，数千の機器を隙間なく見事に組み込んだ傑作である．これによって，対消滅によって生成される粒子をできるだけ多く捕獲することが可能になる．ただ，幽霊粒子ニュートリノだけはこの測定器を素通りする．常套手段として，他に生成された粒子を注意深く測定する方法を用いて，実験者は検知されなかったニュートリノに関する多くのことを学ぶことができる．

LEP の実験者達が早い時期に答えが得られると期待した研究課題の一つは，ニュートリノのフレーバー数に関することであった．そして，この答えの鍵は，短寿命の Z^0 が崩壊するその仕方の中に潜んでいる．電荷，質量－エネルギー，レプトン数などの反応における保存則を満たすなら，Z^0 はそれ自身より軽いあらゆる粒子に崩壊する．一般には，粒子の崩壊先が多ければ多いほど，その粒子の寿命は短い．そのため，Z^0 の寿命は軽いニュートリノの数を反映している．しかし，Z^0 のように作られると同時に崩壊するような粒子

の寿命は，どのように測定するのだろうか．

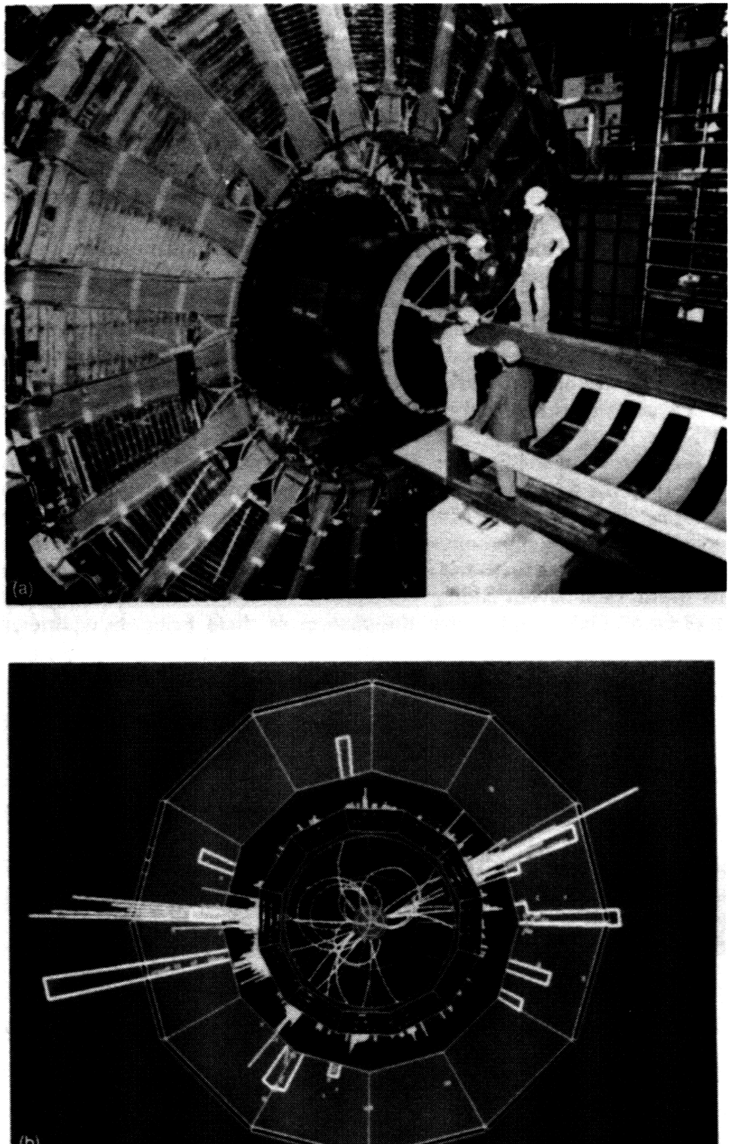
答えは粒子の幅，すなわち質量を求める場合の不確かさを測定すればよい．ここで，私は精密測定の限界に由来する，実験上の不確かさについて事細かに言及するつもりがないことを明確にしておきたい．それよりも，私は短寿命粒子の質量が潜在的に変化することを紹介したい．

ワーナー・ハイゼンベルグは1927年に，ある確かさをもって同時に測定することが不可能な，一対の物理量があることを初めて示した．この現象は，原子やそれよりも小さいミクロの世界でのみ適用される．このような対の1つにエネルギーと時間がある．このハイゼンベルグの“不確定性原理”は，ある特定のエネルギー状態の寿命が短ければ短いほど，そのエネルギーは正確に定義できなくなる．Z^0 のような粒子の場合，寿命が短いほど質量のバラツキの範囲が広がること，つまり幅が大きくなることを意味する．LEPは数百万もの Z^0 を生成できるので，実験によってその質量の幅を高精度で測定できる．

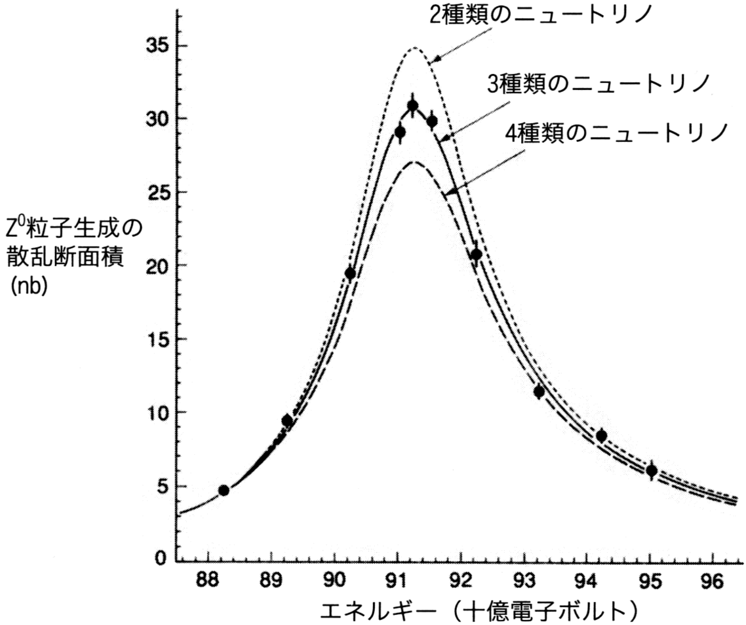
Z^0 の質量を測るためにLEPの実験チームは，Z^0 の質量値よりも低いエネルギー領域から高い領域まで徐々にエネルギーを変えながら，いろんな衝突エネルギーで測定を行った．それぞれの衝突エネルギーで生成された Z^0 数のデータは，89 GeV付近から立ち上がり，91 GeVのピーク値まで登りつめ，それ以上のエネルギーでは89 GeVと同程度の生成数となる94 GeV付近まで，徐々に減少する．このピークの半分の高さにおける幅が，Z^0 の平均寿命の直接測定を与える．そして，ニュートリノのフレーバー数の発見の鍵となる．

LEPが運転を開始してから最初の数週間足らずで，4つの実験チームは合計1100個の Z^0 を測定した．そして物理学者はこれを用いて，Z^0 がニュートリノへ崩壊する崩壊過程の数と連動する Z^0 質量のピーク幅を，十分な精度で測定できた．ニュートリノのフレーバー数が多ければ多いほど Z^0 の寿命は短くなり，その幅は増大する．フレーバーが1つ増えるごとに，150 MeVの幅が追加される．実験データから得られた 2.58 ± 0.08 GeVの結果は，ニュートリノのフレーバー数としてすでに知られている3より多い確率が，千分の1以下であることを示していた．

パウリが最初に軽い質量のニュートリノの存在を提案してから60年後に，



(a) ジュネーブにある CERN の巨大電子・陽電子衝突装置（LEP）に組み込まれた，大型検出器のデルフィ（DELPHI）．この検出器を用いて，弱い力の中性媒介粒子である Z^0 の崩壊を詳細に研究する．(b) LEP のもう一つの検出器，アレフ（ALEPH）の中心粒子飛跡検出器が測定した Z^0 崩壊事象．2 つのシャワー粒子群が正反対方向に作られていることがわかる．(CERN 提供)



LEP で検出された数千の Z^0 の崩壊事象数は，寿命と逆比例する短寿命粒子の質量の許容幅を決定する：すなわち，Z^0 の崩壊過程が多岐にわたるほど，寿命が短くなり，図中のピークの幅は広がる．この幅の測定結果は，Z^0 がちょうど 3 種類のニュートリノに崩壊することを示している．(CERN 提供)

私たちはこのような粒子が3種類より多くも，少なくもないことを知った．しかし，実験によってこれまでに明らかにされたニュートリノの性質と同じ性質を持つ，もっと‘重いニュートリノ’が存在するかもしれないことは確かである．このような‘重いニュートリノ’は，しばしば理論家が提唱する標準理論の枠組みを越えた野心的な研究の中に登場する．しかしながら，実験データに関する限り標準理論は確固としたものであり，次章で述べるような“素粒子を覗く”手段としての軽いニュートリノの計り知れない貢献によって，その成功は確立された．

第5章

素粒子を覗く

ニュートリノは，ラザフォードがアルファ粒子に託した役割をまだ演じていない．しかし，同じ手法による研究の実現が望まれる．[1]

レオン・レーダーマン，1967

“2 種類のニュートリノ発見” の実験は，ニュートリノ・ビームを用いる実験が有効であるのみならず，物質の根本原理を覆い隠すベールを取り払うのに役立つことを実証した．しかしながら，この実験はニュートリノを用いる実験に対して，最初に期待されていた重要課題の 1 つを解決しただけであった．特に “弱い力の正しい理論は何か” という疑問は残されたままであった．

エンリコ・フェルミは 1934 年にベータ崩壊の理論を作って，ニュートリノの存在に真実性を与えた．その後，彼の理論はベータ崩壊以外の弱い相互作用にも同様に，十分適用できることが示され，そして 1957 年の驚くべき発見：“弱い力は空間（または，パリティ）対称性を破る（第 3 章参照）” という概念を含むように修正されただけであった．しかし，フェルミ理論は常に正しい答を与えてくれたとはいえ，誰もが完全な理論でないことを知っていた．

問題点は反応の頻度，すなわち反応断面積の理論計算の中に潜んでいた．フェルミ理論によれば，例えば高エネルギー・ニュートリノが電子と反応を起こす確率は，ニュートリノのエネルギーに比例して増加する．その結果，ニュートリノが電子と反応するたびに，反応確率が 1 を越えるという理屈に

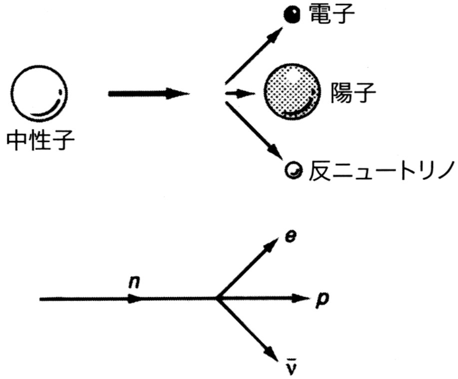
合わない状況が導かれる．言い換えれば，フェルミ理論は，ベータ崩壊のような低エネルギー特有の反応に対してほぼ完璧に適用できるとはいえ，高エネルギー領域ではやがて破綻する運命にある．それでは，高エネルギーにおいても適用可能な理論とは，一体どんな理論なのか？

この新たな“エネルギー危機”を解く1つの鍵は，フェルミ理論そのものと同じくらい古く，フェルミと同年輩の湯川秀樹が提案した弱い力を記述する理論の中にあった．湯川の考察は，荷電粒子が互いに光子を投げ合うキャッチボールを介して相互作用をするという，電磁気力の量子論的記述に基づいていた．彼は原子核の中の陽子と中性子の間に働く強い力を，現在，パイ中間子として知られている，質量が電子の約200倍の粒子をボールとする新しいキャッチボール・ゲームと通して記述することに成功した．しかしパイ中間子は，湯川がその可能性を検討した弱い力の記述には役に立たないだろう．

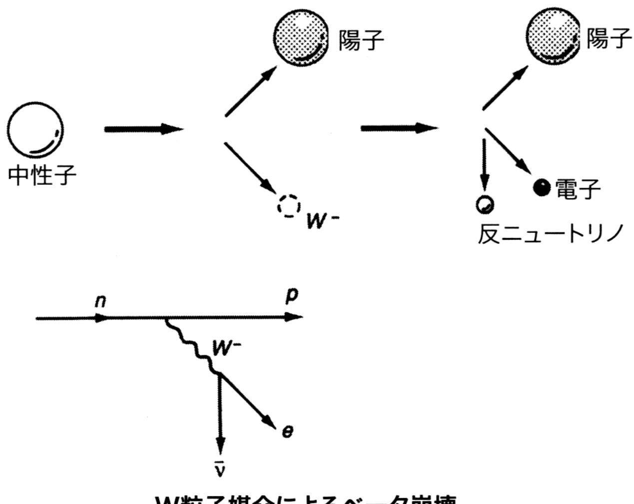
とはいえ，電磁場の量子論は非常に良く成り立つことが確かめられていたので，弱い力の記述に対する青写真となるものであった．理論物理学者は特殊なボール，すなわち“弱い光子（記号Wで表されるようになった）”によって媒介される“弱いキャッチボール・ゲーム”の概念を追求し続けた．その結果，完全ではないとはいえ，フェルミ理論の病根が取り除けることが明らかになった．

理論物理学者は，弱い力を担う粒子：W粒子が相当重くなければならないことを知っていた．このことはフェルミ理論の成功，すなわち低エネルギーで良く成り立つことからも明らかであった．フェルミは中性子のベータ崩壊が1点で起こること，つまり崩壊によって生成される粒子が中性子の消滅点，その場所から発生することを仮定した．そこで，フェルミ理論が働く低エネルギーでは，弱い相互作用はあたかも1点で，つまり，力の媒介粒子の交換が見えないくらい接近して起こるはずである．

この低エネルギーでの振る舞いは，無限の到達距離を持つ電磁気力と比べて，弱い力が短距離力であることを示唆する．電磁気力の媒介粒子である光子は質量がゼロであり，量子論では遠距離まで媒介することが可能になる．一方，弱い力の伝達が短距離であるということは，力を媒介するW粒子が重くなければならないことを意味する．つまり，力の到達距離が短いほど，媒介粒子の質量がより重くなる．しかしながら，W粒子がどれくらいの重さであ



フェルミのベータ崩壊



W粒子媒介によるベータ崩壊

フェルミのベータ崩壊の理論では，ニュートリノは時空の1点で陽子に転換すると同時に，電子と反ニュートリノを放出する．しかし，この理論は高エネルギーにおいて間違った答えを与える運命にある．そのため，この理論は中性子が弱い力の媒介粒子である W^- を放出して陽子に転換し，次に W^- が電子と反ニュートリノに崩壊するという，湯川が提案したような弱い力の理論に置き換えられなければならない（100ページ参照）．

るべきかは明らかではない.

重い弱い力の媒介粒子の存在は，フェルミ理論のエネルギー危機を回避しなかったが，エネルギー危機の始まりを遅らせるものであった．高エネルギー領域における媒介粒子の交換は，弱い相互作用を修正し，反応確率がエネルギーとともに増大する比率を小さくする役割を果たす．弱い相互作用はもはやフェルミ理論のように一点で起こるのではなく，非常に短い距離で作用するかのように振舞うのである．ある意味では高エネルギー領域での実験は，低エネルギー領域において検出不可能な微細構造を覗く顕微鏡の役割りを果たすであろう.

陽子や中性子の高エネルギー衝突反応では，湯川が原子核の束縛力を導出するために予言した媒介粒子のパイ中間子が自由に生成されるように，高エネルギー・ニュートリノ反応では，W粒子の生成が可能であろう．しかし実際には，ニュートリノ反応でW粒子は発見されなかった．栄誉は，1983年に初めてW粒子を生成し，陽子の約90倍の重さであることを見つけた，経路の異なる実験に輝いた．しかしニュートリノは，W粒子の質量を予言し，それゆえ実験に正しい指針を与える，十分に適用能力のある弱い力の理論の構築に貢献した.

ニュートリノ・ビーム

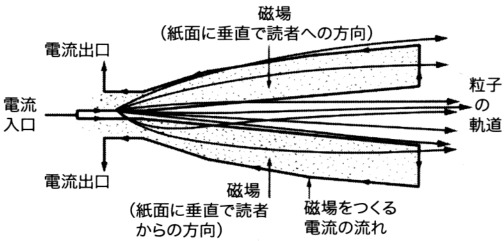
... この10年間に，ニュートリノ実験は技術的に実現困難な状況を脱して，高エネルギー物理学における最も重要な実験分野の1つになるだろう.[2]

コリン・ラム，1966

“2種類のニュートリノ実験” がもたらした副産物は，実験者をさらに大規模な実験へと挑戦させた．ブルックヘーブン研究所で行われたスパークチェンバーによる実験では，ニュートリノの反応数は極めて少なかった．W粒子の発見に遭遇するには，大強度ニュートリノ・ビームの実現と大型検出器の建設が必要になる.

ニュートリノ・ビーム強度を増強する技術は，すぐにCERN（1950年代にジュネーブの郊外に設立された欧州共同原子核研究機関）で開発された.





最初の磁気ホーン．CERN で作られ，装置への組み込み中の写真．この磁気ホーンは，サイモン・バン・デル・メールによって設計されたもので，パイ中間子と K 中間子が崩壊してニュートリノを生成する前に，それらの中間子を収束させることによってより大強度のニュートリノ・ビームを発生させる．模式図はホーン内を流れる電流が，ニュートリノの親である荷電粒子の運動を収束させる磁場を作り出す方法を示している．(CERN 提供)

1961 年初めにオランダ人技術者のサイモン・ファン・デル・メールは，“荷電粒子に指向性を与える装置とそのニュートリノ・ビーム増強への応用” という表題の研究レポートをまとめた．このレポートの中でファン・デル・メールは，“ニュートリノ・ホーン” として知られるようになった装置について，彼の独創的な考えを述べている．

加速器でニュートリノ・ビームを作る場合の 1 つの問題点は，加速器から取出された高エネルギー・ビームが標的物質を直撃し，その際にニュートリノの親粒子が生成される過程の中にある．親粒子の荷電パイ中間子や荷電ケイ中間子は，もともとビーム方向に対していろんな角度を持って飛び出し，ニュートリノの生成源になる．それはちょうど，広い範囲を照らす懐中電灯のようである．しかしながら，十分な強度のニュートリノ・ビームを供給するには，数十メートルの荷電粒子の崩壊長を確保しなければならず，このような広い角度で放出されることはビーム強度の向上を困難にする．電気的中性で，そのため磁場の影響を受けないニュートリノそれ自身を収向させるこ

とは不可能である．そこでファン・デル・メールは，親粒子のパイ中間子やケイ中間子の飛行方向を絞るための装置を考案した．この装置は，最終的に生成されるニュートリノの運動方向がより平行に揃うよう収斂させる働きをする．このことはちょうど，灯台に取付けられているレンズが，ランプから発する光を集光するのに似ている．

ファン・デル・メールの解決案は，連続的に反射を繰り返すことによって光を平行に揃えるように，内面を研磨した円錐容器と同等の機能を持たせるものであった．荷電パイ中間子や荷電ケイ中間子が走る道筋を曲げるために，彼は2重錘状構造の金属容器の間に磁場かけた．錘状容器の中を流れる電流が，錘の根元に置かれた長く薄い金属標的中で発生した荷電粒子を収向する磁場を作る．この装置の予期しなかった成果は，電流を流す方向すなわち磁場の方向に依存して，正と負それぞれの荷電粒子を収向できることであった．このことは，ほぼ純粋のニュートリノ・ビーム（正荷電の親粒子から），または反ニュートリノ・ビーム（負荷電の親粒子から）を作り出せることを意味する．

ファン・デル・メールの“磁気ホーン”の必要性は，CERNでの最初の野心的なニュートリノ実験が突然中断せざるを得なくなった，1961年中頃に訪れた．ガイ・フォン・ダーデルは，陽子加速器（陽子シンクロトロン）からの取出しビーム用に考案された装置によるパイ中間子の生成量が，予想よりもはるかに少ないことに気付いた．その結果，ニュートリノ数は少なく，実験が事実上，不可能になった．CERNの物理学者は，ブルックヘーブン研究所チームがニュートリノ・ビームを用いた最初の研究を始める寸前に来ていたことをすでに知っていたため，方針を変更せざるをえなかった．CERNの新しい計画は，ブルックヘーブン研究所で行えるどんな実験よりもより精密な実験を可能にする，大強度ニュートリノ・ビームの生成を確立することであった．

磁気ホーンはCERNの新計画の主役であったが，さらに技術的な新機軸を必要とした．親粒子はホーンの喉首の所で生成される．このことは陽子ビームを加速器から取り出して，ホーンの狭いほうの端に置かれた金属標的に当てなければならないことを意味する．幸いなことに1959年12月にベレンド・キューイパーとギュンター・プラスは，2.1マイクロ秒（陽子が加速器を1周

する時間）以内に加速器から全ての陽子のたたき出す，“早い蹴り出し”方式を考案していた．

CERN は 1962 年に，高エネルギー・ニュートリノ実験の最初の栄誉をブルックヘーブン研究所に譲った．しかし 1963 年中頃までに，“早い蹴りだし”と“ニュートリノ・ホーン”を組み合せることによって，CERN は世界でもっとも強力なニュートリノ・ビームを勝ち得た．次のステップは，このビームを十分活用できる高性能の測定器を作ることである．

巨大な母

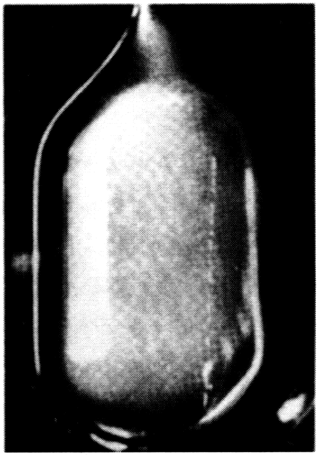
ニュートリノ相互作用を詳細に研究するという我々の夢をかなえるには，どんな測定装置が望ましいか？[3]

バリー・バリシュ，1973

1953 年にミシンガン大学の若き物理学者，ドナルド・グレイサーは，泡箱と名付けられた新しいタイプの素粒子検出器の実用性を立証した．彼の検出器は，有機液体のジエチルエタノール 30cc をガラス製のバイアルに詰めただけのものであった．しかしながらその数年後には，カリフォルニアのローレンス・バークレイ研究所にいたルイ・アルバレの優れた指導のもとで，泡箱は急成長した．彼は 1960 年に，後に数々の発見をもたらした 72 インチ（1.8 m）液体水素泡箱を製作して，大型化の道を切り開いた．さらに時は流れ 1970 年代の初めには，12,000 リットルの液体を詰めたガーガメルと呼ばれる巨大泡箱が，ニュートリノ相互作用を詳しく研究する夢の実現に向けて動き出した．

ガーガメルの由来は，16 世紀のフランスの偉大な作家，フランソワー・ラブレーの創作からきている．彼女はガルガンチュアの母親であった．ラブレーはガーガメルの巨大性を宣伝することによって，当代のフランス事情を風刺した．現代版ガーガメルの泡箱は，アンドレ・ラガリグに率いられたフランスの物理学者と技術者チームの創造物であった．この巨大さは，物理学者に弱い力の新しい振舞いと，原子核の構成要素である陽子や中性子の構造を調べる研究手段を提供した．

泡箱内の液体中を通過する荷電粒子の飛跡は，小さな泡の連なりとして可



宇宙線粒子が細かい泡の飛跡を残す．これは，わずか3cm長のガラスの小ビンにジエチル・エーテルを詰めた最初の泡箱用いて，フラッシュ光で撮影したものである．(D. グレーサ，カリフォルニア大学提供)

視化される．ここで要求される技術は液体に圧力を加え，荷電粒子が泡箱に入射する直前の1秒以内の間で，この圧力を抜くことである．このような圧力の急激な低下は，液体を過熱状態に導く．つまり，まだ液体ではあるが，減圧のために液体の沸騰点が下がり，温度が沸点を越えた状態になっている．もし，荷電粒子がこの状態の液体の中を通ると，道筋の原子をイオン化して持っているエネルギーの一部を失う．このエネルギーは，不安定な過熱状態にある液体中に，沸騰を誘発するに十分な量である．その結果，粒子の通り道に沿って泡の連鎖ができる．

泡箱は，高エネルギー・ビームとして入射する粒子と，液体中の原子核との反応現象についての莫大な情報を提供するため，1950年代に流行の測定器となった．反応によって発生した遅い（運動量の小さい）荷電粒子は濃い泡の飛跡を残し，迅速な（運動量の大きい）粒子は薄く，細かい泡を形成する．泡箱を巨大な電磁石の極板の間に置くことによって，荷電粒子の飛跡は磁場中で曲げられる．正電荷と負電荷の粒子は互いに反対方向の曲線を描く．そして，その曲率は粒子の運動量の大きさを表す．泡箱が液体水素で満たされている場合は，ビーム粒子は水素の原子核である1個の陽子とだけ反応する

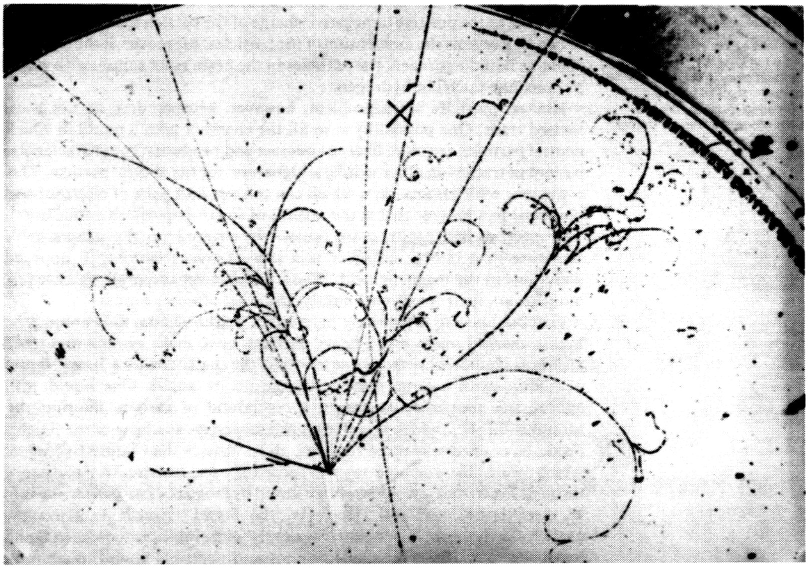
ことになる．

中性粒子はイオン化の痕跡を残さないため厄介であるが，1 つの可能性として中性粒子がより頻繁に反応を起こし，その証となるような特徴を持った飛跡模様をつくる液体を泡箱に充填することである．このよい例に，電子・陽電子対消滅と逆反応過程の対生成を起こすガンマー線がある．電子と陽電子は反対符号の電荷を持っているため，磁場で互いに反対方向に曲げられた一対の飛跡が泡箱内のガンマー線の証拠となる．特に，電子や陽電子の運動量が小さいと，2 本の飛跡は羊の角のようにくるくる巻の模様を示す．

ガンマー線は，多価電荷を持つ重元素の原子核の周りに作られる電場中で，対生成を起こす確率が高い．このため，泡箱中でガンマー線を効率良く見つけるには，"重い液体（大きい原子番号を持つ液体）" を使用すればよい．これに適した液体として，炭素とフッ素，臭素の混合物（CF_3Br）のフレオンがある．フレオンは現在，地球のオゾン層を破壊する要因としてよく知られている．フレオンは液体水素より 200 倍以上の高密度であるため，この中でガンマー線が電子・陽電子対生成を起こすまでに走る距離は，液体水素中での対生成距離と比べて 1/100 以下である．しかしながら，この液体は次のような代償を払わなくてはならない．ビーム粒子はもはや液体水素中のように陽子の単体ではなく，複雑な原子核の中に束縛されている陽子や中性子の複合体と反応することになる．

1960 年代にニュートリノ・ビームを作る可能性が持ち上がると，ただちに泡箱を測定器として使用することが検討された．この当時開発された重い液体を満たした泡箱は，明らかに選択肢の 1 つであった．CERN では，コリン・ラムがプロパンまたはフレオン，またはそれらの混合物を充填できる 500 リットル泡箱を建設するグループを率いていた．CERN の陽子シンクロトロンからニュートリノ・ビームを取り出す運転が始まった 1963 年の半ばに，ラムの泡箱はニュートリノを待ち受ける測定器群の列の 1 番前に置かれた．ほぼ計 60 日の運転の後に，泡箱で測定されたデータから 454 例の負電荷ミューオン事象と，比較的高いエネルギーの 5 例の電子事象が検出され，ブルックヘーブン研究所で行われた "2 種類のニュートリノ実験" の結果を確認した．泡箱は自らニュートリノ検出器としての役割りを実証した．

しかし，検出された事象数は相変わらず少なかった．ニュートリノ反応の

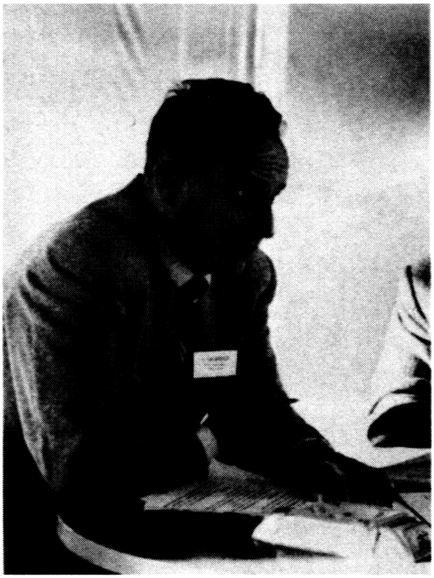


コリン・ラムが作った500リットル重液体泡箱による写真．これは，CERNにおけるニュートリノ反応を研究するための最初の泡箱であった．写真中の飛跡は，ニュートリノが泡箱の中心付近で反応を起こし，スプレイ状に粒子を放出しているものである．飛跡を残さないガンマー線が，どのようにして確認されるかに注目．ガンマー線は重液体の中で，電子－陽電子対に転換し，2本の反対巻きの渦状飛跡を作る．(CERN, G. マイアット提供)

研究にさらなる展開をもたらすには，もっと多くの（10～100）倍の事象数が必要である．このことはより大きな泡箱を要求する．この大型泡箱を実現した人達の中にアンドレ・ラガリグがいた．彼はパリにあるエコールポリテクニークの物理学者であり，重い液体泡箱の開拓者であった．彼の共同研究者のアンドレ・ローゼは，当時を次のように振り返っている：

最初のアイディアは，1963年にシエナのカンポ広場に近い喫茶店での会話の中から生まれた．シエナで開催された素粒子物理学の会議で，我々は高エネルギー・ニュートリノ反応で得られた結果について議論した……． 重い液体泡箱が良い候補であるかのように思えたが，もっと大きな装置を作らなければならなかった．[4]

そこでラガリグは，まさに特大の新しい泡箱：ガーガメルの建設計画を打ち出した．最初の仕事は，彼に協力する研究者達にこのプロジェクトの重大

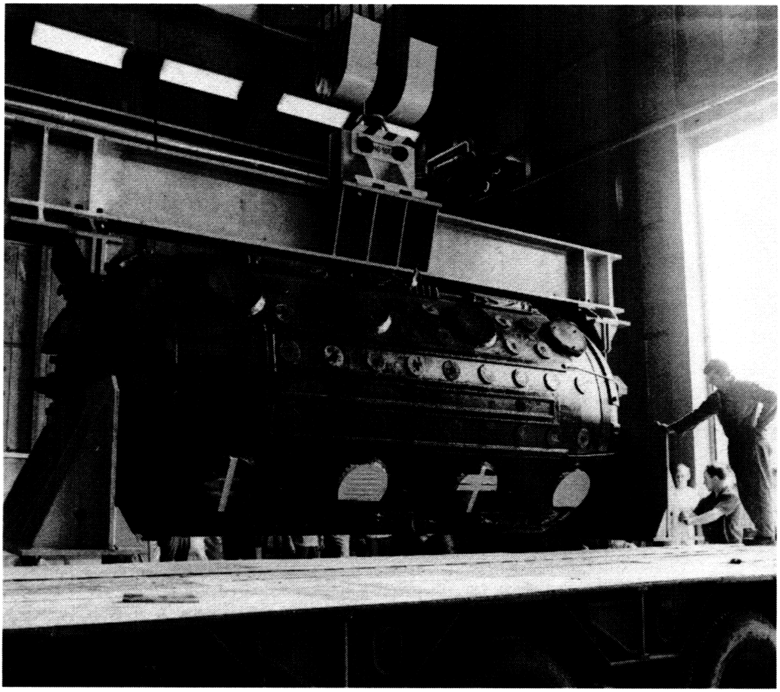


エコール・ポリテクニークのアンドレ・ラガリグ．彼は 1970 年代初めに CERN で幾つかの重要な発見を成し遂げた巨大な重液体泡箱，ガーガメルの建設を指導した．（CERN 提供）

さを認識してもらうことであった．次に，泡箱の建設に資金を提供する権力者達，泡箱の建設が行われるサックレイ研究所の原子核研究センターの人達，そして最後に泡箱が設置される CERN の研究者達にも同様であった．ラガリグはガーガメルのために根気強く説得活動を続け，ついに成功した．1965 年 12 月 2 日，CERN は泡箱の建設を統括するフランス原子力エネルギー省（CEA）と合意書を交わした．

ガーガメルの最終的な大きさは調達可能な資金と，単品では最も高価な装置でその中に泡箱が据付けられる電磁石の値段に大きく左右された．泡箱の形は，反応によって生成される粒子の識別能力に対する要請に依存した．特にこのことは，泡箱がミューオンの長い飛跡と，より頻繁に反応するため若干短めのパイ中間子の飛跡とを，十分に区別できる長さを持つことを意味する．

ラガリグと共同研究者，技術者達は最終設計として，18 トンのフレオンを蓄える直径 1.85 m，高さ 4.8 m の体積 12 m^3 の少しずんぐりした円筒形の



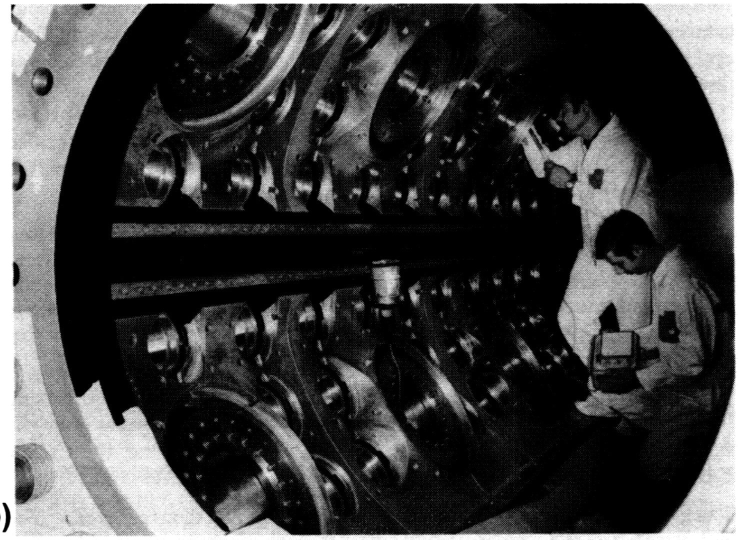
(a)

(a) 1970 年 7 月，CERN に到着した巨大泡箱，ガーガメルの本体．泡箱の上下，長手方向の横 2 列に並んだ，それぞれ 4 個の魚眼レンズ用の大きな窓が見える．(b) ガーガメルの内部写真．内壁の大きな窓はレンズ用，小窓はフラッシュ光用と，運転中に交互に繰返し行われる液体の加圧・減圧のための圧力調整用に使用される．(c) ガーガメルは磁場によって荷電粒子の運動方向を曲げ，運動量や電荷を測定できるように，巨大な電磁石コイルの中に設置される．(CERN 提供)

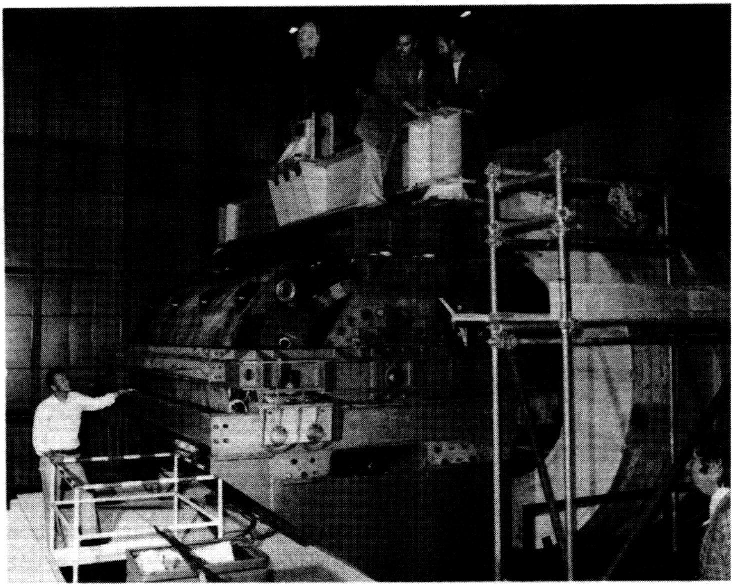
泡箱を提案した．彼らは泡箱内のできるだけ広い領域がカメラの視野に入るよう，4 個の広角魚眼レンズを 2 列に配置した．これによって，12 m^3 中の 10 m^3 を見渡せる泡箱として異常といえるほどの高視野が実現された．

かくして，このプロジェクトの指導的役割を担う物理学者の一人で，ラガリグとともに多くの重責をこなしたポール・ミュッセが，“華麗な技術的冒険”と呼んだプロジェクトが始まった.[5] 1975 年のラガリグのあまりにも早すぎる死の後に，ミュッセはこの冒険の真意を語った：

このプロジェクトの建設の各段階で得られた成果は，我々を大いに勇気づけ，その先



(b)



(c)

の建設や性能試験を引き続き行う十分な気力を与えてくれた．時折，難局に遭遇し，我々の技術的限界が思い知らされることもあった．しかし，ついにこの長期間の作業は終結した．アンドレー・ラガリグは最初の写真を手にとり，技術上の改良点を議論した．その時の彼の喜びを忘れることができない．[6]

最初の写真撮影は，CERN と CEA（フランス原子力庁）の間で合意が交わされてから丁度 4 年後の 1970 年 12 月 8 日の夜で，この泡箱で初の加圧・減圧試験の最中であった．CERN が発行する雑誌 “CERN Courier” は，この時の様子を次のように伝えた：

膨張サイクルに入って最初の “ドスン” という音が聞こえた時，制御室に張り詰めた空気が走った．そして，誰もが同様に何か異常なことが起こっていないかどうかを確かめようと，監視窓越しにじっと見つめた．楽天家は宇宙線による飛跡を見つける作業にとりかかった．悲観家は，何一つ異常な点を見つけることができなかった．30 分後に，最初のフィルムの撮影と現像が終了し，ついにフィルムは目標が達成されたことを示した．そこには，宇宙線の飛跡が映っていた．泡箱チームは自らの偉業を祝った．[7]

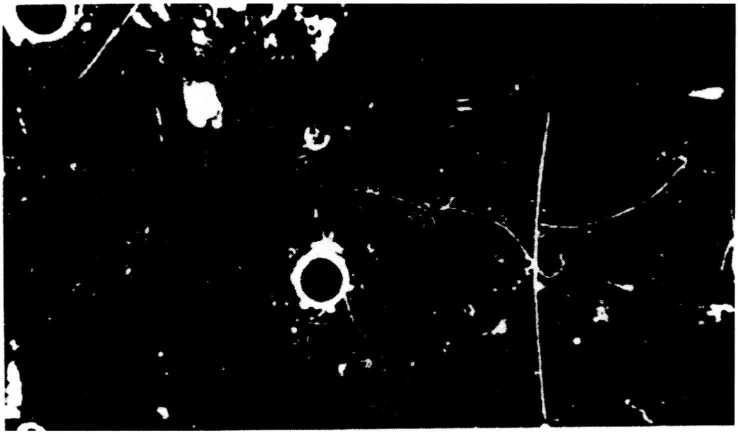
1 年もたたない 1971 年 11 月に，ガーガメルが 50 万枚の写真を撮影した時，“CERN Courier” はさらに特集記事を載せた．今や，ラガリグと彼の共同研究者達は，これまでとは別の挑戦に臨んでいた．それは，まだ十分に理解されていないニュートリノと物質との反応に関する重要な新現象が潜む，これらの全ての写真を注意深く解析することであった．

中性カレント

我々の研究分野では，難局を打開する突破口が往々にして数少ない事象例の発見によってもたらされる．…私が今ここに示している 1 例が大発見につながるかどうかはさだかではないが，そうなることを祈ろう．[8]

ドン・パーキンス，1973 年 7 月

英国の素粒子物理学研究における指導者的存在の 1 人であるパーキンスは，高エネルギー物理学者を目指す若い世代の聴衆の前で，このように語った．これからやってくる歴史的瞬間が，パーキンス流の控えめな語りの中に覆い隠されていた．その 1 事象例とは，ガーガメルによってもたらされたもので，



ガーガメルが捕らえた歴史的瞬間の写真：ニュートリノが弱中性カレントによって電子と反応を起こした最初の現象例. 写真の左手から伸びる飛跡は，高エネルギー・ニュートリノによって液体の構成要素である原子から叩き出された電子のもの. 電子による飛跡は，走行中に他の電子と衝突して特徴的な短い巻き毛状の枝を持つ.（黒い中心部の回りの白いスポットは，泡を照らすために使用されるリング状フラッシュ光である）（CERN 提供）

この時点までに解析が終了した 37 万 5 千枚のニュートリノ事象と，36 万枚の反ニュートリノ事象の中から選び出されたわずか 1 枚であった.

この事象は確かに大発見になることをはきりと示していた. それは弱い力と電磁気力を 1 つの電磁弱理論に統合する素粒子理論の画期的な発展を確かなものにする，ニュートリノの新しい反応例の最初の証拠であった. しかし，もしパーキンスが 1973 年 7 月にまだ決定的ではなく疑わしいと感じたなら，彼にはその事象を葬る権限があった. 問題になる事象を見つけ出すことは，諺どおり "干草の山の中から針を探す" ようなもので，見つけ出したものが針であるか，または針のような干草の 1 片であるかを判定する難しさは，さらに実験を困難にした.

若きオランダの物理学者，ジェラルド・トホーフトの論文が引き金となり，弱い力と電磁気力の統一が現実味を帯びてきた. このことは 1971 年の後半に，素粒子理論家達の興奮を高めた. 基本的な考え方は，ロンドン王立大学のアブドゥス・サラムとハーバード大学のスティーブン・ワインバーグがそれぞれ独立に 1960 年代に発展させたもので，決して新しくはなかった. トホー

フトが成し遂げた仕事とは，理論から無意味な無限大の発散を取り除く“くりこみ”として知られている方法を見出したことによって，電磁弱統一理論に息を噴き返らせたことであった．スタンフォード大学の理論家のシドニー・コールマンは，後に次のように書いた：トホーフトはワインバーグやサラムのカエルが，魔法をかけられた王子であることを示した．[9]

トホーフトの同僚の理論家達は直ぐに彼の手法を検証しようと飛びついたように，その反応は熱烈であった．しかしながら，ワインバーグ自身は次のように指摘した：その理論は美しいとはいえ，

> 特定の単純化された我々の理論が，自然の選択肢そのものであるということは，それほど明白なことではない．もちろん，このことは実験家が決着をつけるべきことである．[10]

舞台は実験家に引き継がれる用意が整った．そして，理論家は電磁弱統一理論が支持されるのか，または否定されるのか，データを待ち望んで彼らを見守った．

電磁弱理論を特徴づける鍵は，新粒子の要請であった．Z^0 と呼ばれるこの粒子は，弱い力を記述する理論の中で重要な役割を担う荷電 W 粒子と同じ仲間の電気的に中性の粒子であった．

もし Z^0 が存在するなら，Z^0 は特有の“弱いキャッチボール”ゲームを引起すだろう．ゲームの参加者は Z^0 を交換する時，電荷を持っている者はそれを変えない．このことは，中性子のベータ崩壊のように荷電 W 粒子がボールの時の反応過程と対照的である．すなわち，中性子が陽子に変わり負電荷の W 粒子を放出し，この W^- はほぼ同時に電子と反ニュートリノに転化する．このようにして，中性子は陽子に変化して電荷を変えるが，これによって生じた電荷の差し引きは，電子に手渡される．電磁気学からの類推により，弱い相互作用のこれら 2 つの異なったタイプの反応は，荷電カレント反応（電荷が交換される場合）および中性カレント反応（荷電交換がない場合）と呼ばれている．

理論家はすぐに電磁弱理論の成功が，中性カレントの存在に左右されることを察した．しかしながら，これまでの実験結果にはこのような反応の兆候はなにもなく，失望させられるものであった．電磁弱理論の創始者達がトラ

ンプ遊びのカードを手にして以来，このゲームの終了はまだ遠かった．しかし，サラムとワインバーグは，荷電カレントと中性カレントの相対強度がいくらであるべきかについて，正確な推定値を与えた．

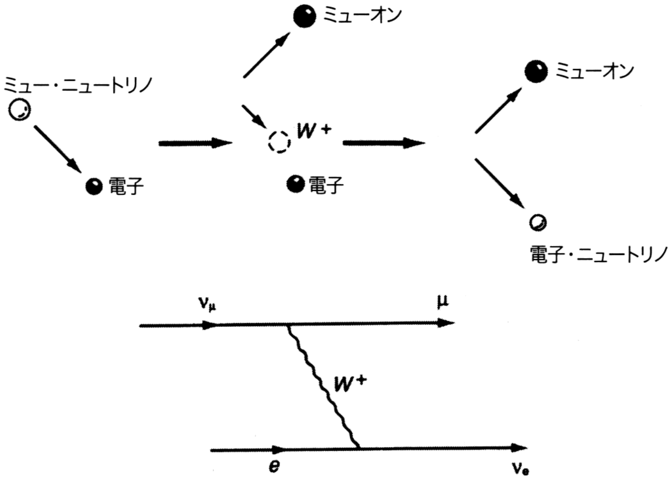
1971 年後半にワインバーグは，これまで行われた実験が予測される中性カレント反応強度に対してほとんど検出感度を持っていなかったことを計算によって示した．そこには，検出を困難にしているいろんな要因があった.[11] そして，中性カレントを探す最適の場は，ニュートリノと物質との相互作用の測定にあった．ニュートリノは強い力や，電荷を持っていないために電磁気力を感じない．そのため，弱い相互作用の効果は，これらの他の力に起因する大量の邪魔物事象の中に埋もれることはない．

この間に CERN では，理論家達がトホーフトの研究の重要性を実験家に説き，中性カレント探索を奨励し始めた．ガーガメルはすでに，50 万枚以上のニュートリノと反ニュートリノ相互作用の写真を撮り終えた．核心に迫る証拠が，この写真の山の中に埋もれているのだろうか？

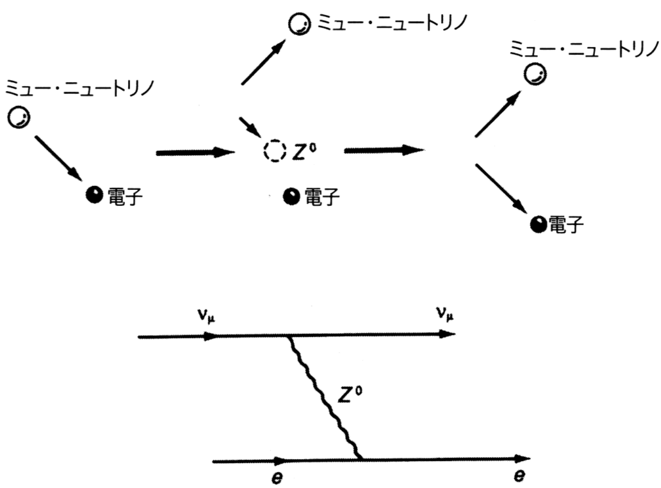
ガーガメルのニュートリノ実験には，ヨーロッパの 8 研究機関：アーヘン，ブリュッセル，ミラノ，オルセイ，オックスフォード，パリ（エコールポリテクニーク），ロンドン（ユニバーシティ・カレッジ），CERN に所属する 50 人以上の物理学者から構成されるチームが責任を持っていた．技術者達が毎日の泡箱の運転に従事する一方で，物理学者の主な仕事は写真解析作業を組織し，とりまとめることであった．そのため，写真は各研究機関に分配された．

ガーガメルは，できるだけ泡箱内部の広い領域を写真に収めることができるよう，4 台の広角レンズを平行に 2 列並べた．2 セットの 70 mm フィルムは，それぞれの列に 1 セットずつ装填され像を記録した．現像の後にフィルムに映った像を解析するため，物理学者は像を特別に作られたテーブルの上に拡大投影した．彼等はテーブル上で興味深い飛跡を追いかけ，泡の位置の測定結果を直接，電子計算機に入力した．CERN とユニバーシティ・カレッジのチームは，“ジェミニ” と呼ばれた投影システムと測定テーブルのヒナ型を設計し，製作した．そして全測定システムは，スウェーデンの会社（SAAB）が製造した 14 台のテーブルを中心に構成され，このシステムは各研究機関に配置された．

多くの泡箱実験と同様に，ガーガメルの写真解析の第一段階は，物理学者



W粒子を媒介する荷電カレント反応



Z^0粒子の媒介する中性カレント反応

典型的な弱荷電カレント反応では，ミュー・ニュートリノは電子と出会うと荷電 W^+ 粒子を放出して，ミューオンに変わる．一方電子は W^+ を吸収して電子ニュートリノに変わる．同じ粒子による弱中性カレント反応では，ミュー・ニュートリノが中性 Z^0 粒子を放出し，電子がそれを吸収しても，双方の粒子は他の粒子に転換しない．

によってではなく，特別な幾何学模様を持つ飛跡を拾い出し，正確に測定する訓練を受けた“スキャナー”チームによって行われる．スキャナーは，期待される特徴を持つ“反応現象”，または“像”を選び出す．一方で物理学者は，ニュートリノ反応のいろんな側面を詳細に調べる少人数のチームを結成した．彼等は，探し出す現象のマニュアルをスキャナーに示し，異常な現象，または重要な現象が映っている時は，自らそれらを入念にチェックした．しかしながら物理学者の仕事の大部分は，ニセ物の現象と探すべき現象との見間違えを理解することと，ニセ物現象を取り除く“フィルター”が適切であるかどうかを確認することに費やされた．彼等は干草ではなく，その中に埋もれている針を探していることを確認する必要があった．

中性カレントの探索では，これ以外に信頼の置ける方法はどこにもなかった．この作業はガーガメル・チームが実施した一連の研究プログラムの単なる一課題として，1971年に開始された．しかし，トホーフトの研究によってもたらされた理論的興奮の高まりが確かなものになってきてからは，重要度が一変した．1972年の1年間，実験チームは探索に多くの労力を注いだ．そして，それぞれのグループは，いろんな異なるタイプの中性カレント探索に専念した．

中性カレント反応の単純な例の1つは，ニュートリノと電子との弾性散乱である．この場合，ニュートリノは電子とぶつかり，双方の間でエネルギーと運動量だけが交換される．しかしながら，この反応過程はまれにしか起こらない．もっと一般的な中性カレント過程は，ニュートリノと原子核内に束縛されている核子（中性子または陽子）との散乱であるが，実験的に同定することはより困難である．

どのような難しさがあるのかを考えてみよう．ニュートリノは検出器に入っても飛跡を残さない．それが検出器内で何かと衝突し，ある角度方向に走り去るが，同様に飛跡は残らない．何かが起こったという唯一の証拠は，ニュートリノとぶつかった相手が運動を始めた時に，特徴的な飛跡や複数の飛跡模様を残すことによって作られる．

ニュートリノ－電子散乱の場合には，電子のみが走り出すことは明らかである．これと最もよく似た他の反応は，電子・ニュートリノが中性子と衝突して引き起こす逆ベータ崩壊反応，つまり陽子と電子が生成される反応である．

もし，泡箱の中で認識されるような飛跡を残すに十分なエネルギーが陽子に与えられないなら，この反応は電子との弾性散乱と生き写しである．ガーガメル・チームは名目上，ミューオン・ニュートリノ（または反ミューオン・ニュートリノ）ビームを用いて実験を行ったとはいえ，中性K中間子の崩壊によって生成される電子・ニュートリノ（反電子・ニュートリノ）が，ビーム中に1%（0.1%）混在していた．そのため，邪魔者である逆ベータ崩壊反応が起こる可能性があり，実験チームの作業を困難にした．

ニュートリノと核子散乱の場合，問題はより深刻である．この反応で，核子が複数個のパイ中間子を生成するのに十分なエネルギーを得ると，泡箱内でスプレーによって撒き散らしたような粒子飛跡（スプレー粒子群）を残す．ミューオン・ニュートリノビームによる反応の鍵となる特徴は，これらの飛跡の中にミューオンを含まないことである．もしミューオンが存在すると，ミューオン・ニュートリノがミューオンに転換する荷電カレント反応が起きていることになる．

しかしながら，高エネルギー・パイ中間子は泡箱の中ではミューオンのように見える．この2種類の粒子を見分けるためには，飛跡を遠方まで追跡しなければならない．もし粒子が途中で崩壊していれば，それはパイ中間子であり，飛跡がどこまでも続き十中八九，泡箱から抜け出ているなら，それはミューオンである．ここで，ガーガメルの長さが重要になる．さらに中性子も問題である．中性子は核子と衝突してミューオンを含まない反応を起こす．そしてニュートリノと同様，中性子は何かと反応しない限り泡箱の中では姿を見せない．そのため泡箱の外の物質中でニュートリノによって作られた中性子は，泡箱内に侵入して中性カレントの擬似反応を起こす．

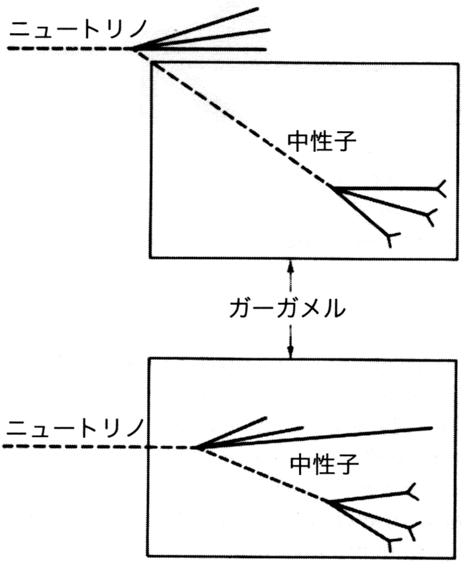
物理学者は，このような擬似反応を起こす中性子の大半が低エネルギー中性子による反応であることに着目し，スプレー粒子群の全エネルギー測定値が比較的小さい現象を拾い出すことによって取り除いた．しかし，僅かながらも高エネルギー中性子の寄与が残ってしまう．物理学者ができることは，このような現象の頻度を見積もることであるが，彼等はこの見積もりに信頼性を与えるある手法を知っていた．泡箱内でスプレー粒子群の1粒子として生成された中性子は，泡箱を飛び出す前に原子核と反応して第2のスプレー粒子群を作るだろう．このように最初の反応に随伴するスプレー粒子群の発生



ガーガメルで撮影された写真はこのようなテーブル上に投影される．このテーブルは，参照マーク（X 印）からの飛跡の相対位置を測定するために特別に設計されたものである．（CERN 提供）

頻度を数えることによって，泡箱内での中性子生成率を計算することができた．そして，高エネルギー中性子が泡箱の外で作られた後に内部に侵入する数を，外挿によって推定した（p. 166 の図参照）．

1972 年の 1 年間，ガーガメル・チームの数人は，捕らえ難い中性カレント反応を同定するために，長時間のきつい仕事に労力を費やした．彼らは陽子とパイ中間子を伴い，ミューオンを含まないスプレー粒子群の映っている確かな写真を見つけた．しかし，これらは中性カレントの証拠となるだろうか？ 彼らは厄介な迷い込んだ中性子ではなく，ニュートリノがこれらの反応を引起したと確信できるだろうか？ ポール・ミュッセやアントニオ・ピューリアらの実験チームのメンバーは，国際会議の発表の場で，いかにして招かざる客の中性子によるバクグランド現象と判断するに至ったかを説明するこ



ガーガメル本体の外側周辺部で，ニュートリノ反応によって作られた中性子は，泡箱内に進入してニュートリノによる中性カレント反応と似た擬似現象を引起す．この現象を調べるには，物理学者はどの位の頻度で中性子が作られ，泡箱中で反応を起こし，粒子生成現象を伴うかを計算しなければならなかった．すなわち，中性子が中性カレントの擬似反応を引起す頻度である．

とに考えを集中させた．

その後，1973年1月の初めにアーヘン大学のスキャナーの一人は，稀な現象に注目し，それをミューオン＋ガンマー線事象に分類した．大学院学生であったフランツ・ハーゼルトはこの写真を見に行き，スキャナーが間違いを犯したことに気付いた．シェパード犬の鍵鼻のように見えるこの現象は，1個の電子の飛跡と，それがガンマー線を放射してそのガンマー線がガーガメルに詰められた重いフレオン液体中で電子－陽電子対を生成する過程の繰り返しであった（159ページの図を参照）．さらに，この現象は反ニュートリノ・ビームによるものであるため，逆ベータ崩壊反応で飛跡を残さない陽子を伴って出てくる電子の確率は極めて小さい．

この発見は，価値ある心理的作用をもたらした．今や，ガーガメルはニュー

トリノ－核子散乱のみならずニュートリノ－電子散乱においても，中性カレントの証拠を提供した．そして，実験チームのメンバーの多くは，自分たちが何を実際に検出したのかを理解しようと，最終的な解析作業に加わった．大部分の労力は現象についての議論と検討にさかれ，いろんな解釈が実験チームの基盤であるそれぞれの研究機関から提案された．しかし，それらは中性子によるバックグランド現象の理解を確かめるものであった．

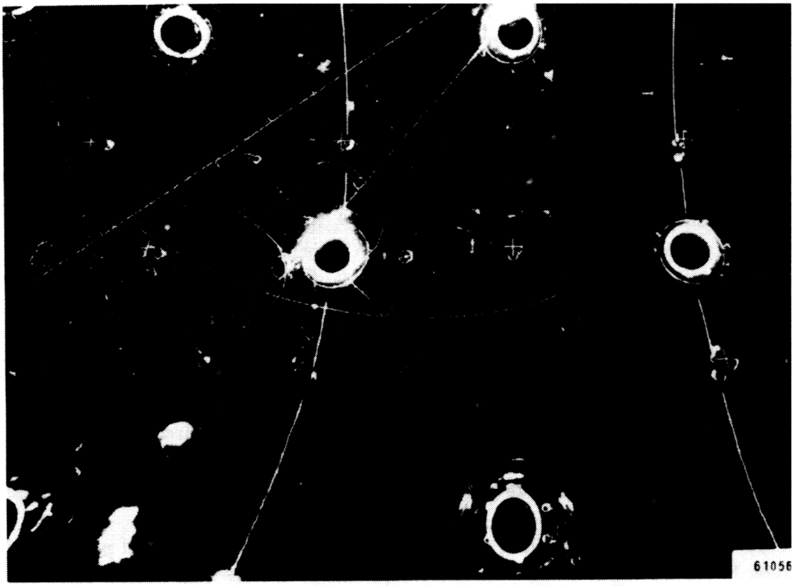
その夏の中頃までに，実験チームはおおかた自分達が中性カレントを検出していることを確信した．ニュートリノ－核子散乱の探索では，彼らはニュートリノ反応が映っている約 83,000 枚，反ニュートリノ反応の 207,000 枚の写真を調べた．これらの現象の中から 102 枚がニュートリノと原子核との反応，64 枚が反ニュートリノ－原子核反応のように見えた．中性子によって引起されると考えられる現象数は少なく，ニュートリノ現象に対して 12 例，反ニュートリノ現象に対して 14 例であった．

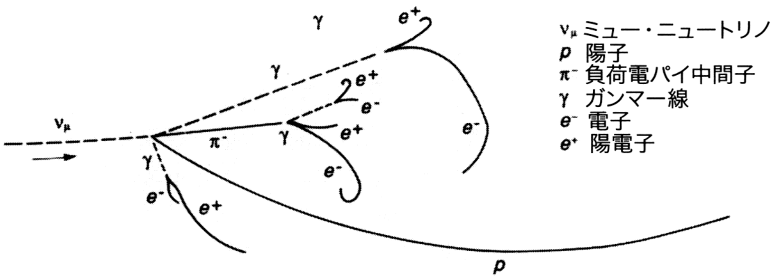
実験チームは，1 個の電子現象を記述した論文を論文誌：フィジクス・レターに投稿した．この論文は 7 月 2 日に編集部に届いた．ニュートリノ－核子現象に関する論文はこれに続き，7 月 23 日に届いた．一方でミュッセは 7 月 19 日の CERN でのセミナーで，中性カレントを発見したことを公表した．

その後，ガーガメル・チームは世界中の素粒子物理学者に彼らの発見についての説得活動を繰り広げ，次々といろんな国際会議で講演を行った．9 月初旬には，エクソン－プロバンスにいたサラムは，この知らせを直接聞くことができた．

私はポール・マシューと一緒にエクソン駅で列車を降り，馬鹿げたことにこれから滞在する学生寮へ重い荷物を持って歩いて行こうと決めた時のことを思い出す．我々の背後から車がやってきて，止まり，運転者が首を出した．それがミュッセであった．彼は窓から乗り出してじっとこちらを見つめ，“サラム氏ですか”と尋ねた．私は“そうです”と答えた．彼は“車に乗って下さい”，“あなたに良いニュースを持ってきました”，“我々は中性カレントを発見しました”と言った．私は中性カレントの発見を聞いて元気付けられ，安堵したかどうかについては言うまでもない．[12]

それは CERN とガーガメルで働いていた物理学者にとって，栄光のひと時であったが，1973 年の暮れには一変して悪夢になった．ガーガメル・チームは，アメリカで行われたニュートリノ実験で，中性カレントの証拠が見つ





このガーガメルによる写真は，泡箱に充填された液体中の中性カレント反応を示す．ニュートリノは左手から入射し，原子核内部の中性子と反応を起こした．この反応で，ミューオンが作られた形跡はない．ニュートリノの反応点から走り出て，泡箱内で止まった長い飛跡は陽子によるものである．(CERN 提供)

かったという知らせが届いたこともあって，結果を全て論文にすることにした．しかし，その年が暮れようとした時，アメリカからの新しい結果は，全ての結末に暗雲を投げかけた．



アブダス・サラム（左）と祝杯するポール・ミュッセ（右）：ガーガメル・チームの指導者の 1 人．この時，電磁気力と弱い力を統一する理論的研究に対して与えられた 1979 年のノーベル賞に，サラムが受賞者の一人に選ばれた知らせが入った．この理論のもっとも重要な点は，ガーガメル実験で見事に検証された中性カレントの存在の予言である．(CERN 提供)

ガーガメル・チームが最初に撮った写真を解析していた頃，新しいタイプの高エネルギーニュートリノ実験がアメリカで具体化された．シカゴの西に広がるイリノイ平原に建設された国立加速器研究所（今のフェルミ国立加速器研究所：フェルミ研究所）で，1972 年に大型陽子加速器が運転を開始した．この装置は，陽子を 400 GeV のエネルギーまで加速できた．このエネルギーは，CERN の PS で加速される陽子エネルギーの 15 倍以上である．加速器リングからかなり離れた，1 km 続く土盛りの終端にニュートリノ実験エリアがあった．この土盛りは，加速器から取り出された高エネルギー陽子が生成

する粒子と，その粒子の崩壊によって作られるニュートリノ・ビームの中に混在する不要な粒子を遮蔽する役目を持つ．

フェルミ研究所での最初のニュートリノ実験は，2 つの機能を持つ検出器で構成され，ハーバード，ペンシルバニア，ウィスコンシンの各大学とフェルミ研究所のチームが参加した．先頭部分は“ニュートリノ標的検出器”で，液体シンチレータで満たされた 16 台の大きな平たい容器と，各容器の間に配置されたスパーク・チェンバーから構成されていた．ニュートリノが液体シンチレータと反応すると，荷電粒子がスプレー状に飛び出す．光電子増倍管は，これらの粒子が液体シンチレータ内を通り抜ける際に発する光（シンチレーション光）を全て検知し，スプレー粒子群の全エネルギーを測定する．また，スパーク・チェンバーは，粒子群の飛跡を記録する．

検出器の後部は，巨大な 1 m 厚の磁気を帯びた 4 枚の鉄片と，同じく鉄片の間に粒子飛跡を検知するスパーク・チェンバーが配置されていた．この部分はミューオン検出が目的であった．ミューオンは，全ての鉄片の中を突き抜けることができる唯一（ニュートリノを除いて）の粒子である．そして，磁場の中で曲げられた粒子の飛跡から，ミューオンの運動量が測定される．この検出器は全体で，$4\,\mathrm{m}^2$ の面を持つ容器の中に 70 トンの液体シンチレータを装備した．このことは，わずか 10 トン（撮影視野に入る量）の液体を内蔵するガーガメルよりも，ニュートリノ反応の検出頻度を多くする．

1973 年夏のフェルミ研究所の実験から得られた最初の結果は，ガーガメルによる中性カレント特有のミューオンを含まない現象の発見を，確認したかのように見えた．8 月にアメリカ・チームは，フィジカル・レビュー・レター誌に論文の原稿を送ったが，翌年の 4 月まで掲載されずに放置される運命にあった．それは，以下のような混乱の秋が訪れたためである．

フェルミ研究所のチームはその後，検出器を改良してミューオンを含まない現象を探したところ，このような現象の数が極めて少ないように見えた．すなわち，フェルミ研究所とガーガメルの結果の間に明らかな矛盾が生じた．CERN の上層部の何人かは，“ガーガメルの発表した結果が間違っているのだろう”と受け取り，パニックに近い状態になった．しかし，実験チームは断固としてひるまなかった．一方，フェルミ研究所のチームは 11 月中旬までに，中性カレントの証拠が全くないことを主張した新しい論文を書き上げた．

しかしながら，この論文は投稿されなかった．なぜなら，彼らは検出器を十分に理解しようと，その作業を継続したところ，徐々に“ミューオン・ナシ現象，すなわち中性カレントはやはり存在する！”という結論に辿り着いたからである．

フェルミ研究所の実験チームが彼らの全ての問題点を解決したのは，結局，翌年の2月であった．そして，ついに彼等の最初の論文“ニュートリノによるミューオンを含まない非弾性散乱の検出”を発表するに十分な確信を持った．4月には，3番目のニュートリノ実験，今度はイリノイ州にあるアルゴンヌ研究所の4m泡箱を用いた実験で，再び中性カレントの決定的な証拠が見つかった．

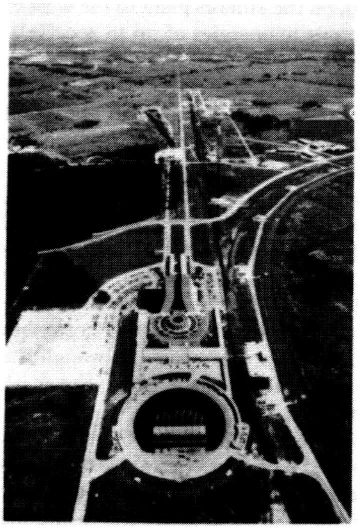
“中性カレントは存在するのか，しないのか？”アンドレ・ローゼは，1974年4月にペンシルバニアで開かれた“ニュートリノ’74”国際会議で尋ねられたが，彼は次のような曖昧な言い方で言葉をにごした：

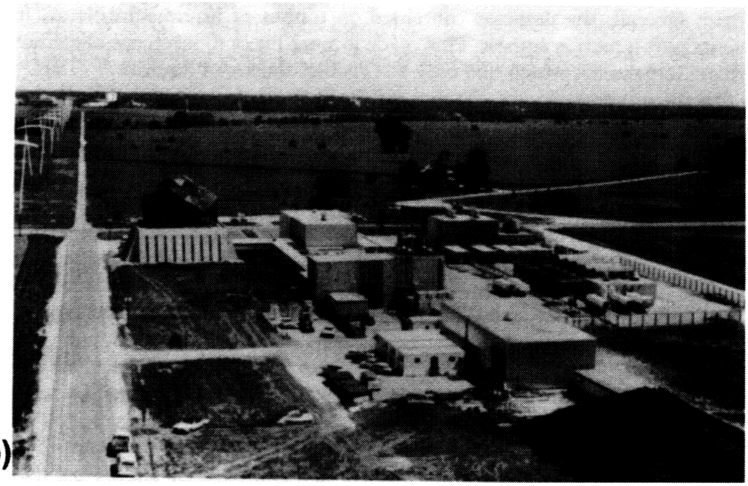
中性カレントは理論家にとって，今日，実験で得られた結果の最良の解釈に思える．[13]

2週間後，ドン・パーキンスはもっと自信を持って中性カレントについて語った：

この現象は，3箇所の加速器による4つの別々の実験で検出された．そして，中性カレントの存在はゆるぎないものとして確立された … この発見は … 検出精度から，2つの基本的な相互作用（弱い相互作用と電磁相互作用）の統一を初めて強く支持する．これは意義ある前進だ．[14]

これ以来，中性カレントの研究はトピックスの権利を獲得した．しかし，多くの研究者がすぐに指摘したように，中性カレントの発見は元来，ワインバーグとサラムの統一理論が正しいことを証明するものではなかった．すなわち，他の種類の理論もまた，中性カレントを必要とした．そのため時代は，中性カレントの研究から電磁弱理論が予言する振舞いを検証することに移った．一方，ガーガメル実験は物理学者を陽子内部の奥底に導くような，素粒子の他の側面に関する知見を蓄え続けた．





(a) 1976 年のフェルミ研究所の空中写真．ここに加速器の主リング（右側に見える部分で，リングを周回して地表に作られた“サービス道路”が目印）から離れて，上部に伸びる陽子ビーム用の土盛りが見える．陽子ビームはこの先のスイッチ・ヤードで分配され，いろんな実験施設へ供給される．陽子が作る粒子ビームの一つがニュートリノ・ビームである．ニュートリノ・ビームはニュートリノ区域（近接写真 (b)）の実験施設に到達するまでに，長い距離を飛行する．(Fermilab 提供)

陽子の内部

・・・それはまさにラザフォード時代の到来である．・・・最初は陽子の電荷は内部に幾分広がって分布し，その空間内で陽子の性質は分散していると考えられていたけれども，陽子と入射粒子との散乱を調べることによって，それは間違いであり，陽子は・・・はっきりした点状の内部構造を持っていた．[15]

リチャード・ファインマン，1974年4月

ラガリグと彼の共同研究者達がガーガメル計画をかかげた時と同じ年に，理論家のマレイ・ゲルマンとジョージ・ツバイクは，物質構造の新しい階層であるクォークについての考えを推し進めていた．しかし，多くの素粒子物理学者は，クォークの概念を受け入れることに足踏みした．そもそも提唱された陽子や中性子の構成粒子は，いくつかの奇妙な性質：特に電子や陽子の単位電荷の 1/3 や 2/3 という分数電荷を持っていた．1971 年にフレオンを一杯に満たした大女（ガーガメル）が，ついに大きな唸り声を発して体をゆすり，初めてニュートリノを呑み込んで以来，クォークに対する認識が微妙に変わってきた．単なる数学的な美としての対称性の域を越えて，クォークにそれ以上の意義があるかどうかを調べる実験が始まった．

重要な実験が，カリフォルニアにあるスタンフォード線型加速器研究所（SLAC）で行われた．1967 年夏，SLAC とマサチューセッツ工科大学（MIT）の研究者チームは，陽子の内部を覗く新しい強力な装置を使って実験を開始した．全長 3 km の加速器は 16 GeV まで電子を加速し，それを液体水素標的に送り込んだ．一連の検出器群は，標的中の陽子との衝突によってエネルギー損失を伴い，衝突のたびにいろんな角度に散乱される電子を捕らえた．

興味深い研究のひとつは，新しい粒子が生成されるエネルギー領域での相互作用：非弾性散乱と関係していた．ここで，突拍子もない何かが起きていることが，すぐに明らかになった．物理学者は 1 回，1 回の散乱を検出することによって，電子から陽子へ移行した運動量を計算することができた．そして彼等は，大きな運動量移行を伴う反応の確率が，驚くほど大きいことを見出した．つまり，高エネルギー非弾性散乱が起こる確率は，運動量移行の変化にもかかわらず，点状電荷との単なる散乱の理論と比べてほとんど違いがないように見えた．言い換えると，高エネルギー非弾性散乱は点状の粒子



1970 年の初めにスタンフォード線型加速器センター（SLAC）は，陽子が内部構造を持つことを示す決定的な実験証拠を見つけた。中央に見える建造物は，電子線型加速器を収納するもので，写真下方の電子源からフリーウェイの上方にある実験区域まで，3 km に渡って伸びている。（SLAC 提供）

との散乱と同じであった．このことは，運動量移行が増えるにつれて相対確率が急激に減少する，低エネルギー領域の弾性散乱および非弾性散乱と著しく異なっていた．

何が起こっていたのか？ 我々が言えることは，電子は大きさを持たない点状粒子であり，空間的に広がっているかのような振る舞いを示さない．このことは，量子電磁力学が電子の運動を十分な精度で記述でき，この理論が電子を単なる点状粒子として取り扱っていることに由来する．対照的に低エネルギー電子と陽子との散乱実験は，陽子がある大きさを持つことを示す．そして，陽子の電荷は空間のある領域に分布している．この“ボカシ現象”のために，低エネルギー電子はほとんど方向を変えずに，陽子の中を通り抜ける．

しかし，SLAC における高エネルギー電子散乱実験は，陽子の異なる側面を示していた．ここでは，電子は陽子に大運動量を付与し，予想以上の大角度で散乱された．この現象は，電子がボカシ（霞がかかったような）状態の陽子と出会う時には起こりえず，陽子内部で点状に局在化した電荷と衝突する時にのみ生じる．それはある意味で，ラザフォードによる原子核発見の物語の再現であった．しかし今回は，アルファー粒子に代わって高エネルギー電子がミサイル役を演じ，原子核ではなく，原子核内部の固い何物かによって横道に蹴り出された．

1968 年の夏，ウィーンで開かれた第 14 回高エネルギー物理学国際会議で，SLAC から出席したヴォルフガング・パノフスキーは，電子散乱に関する総合報告を行った．SLAC–MIT グループが出した最初の高エネルギー非弾性散乱の結果について言及し，次のように論評した：

> 定性的に言える顕著な事は，これらの断面積が … 弾性散乱の断面積と比べて，運動量移行の増加とともに非常にゆっくりと減少することである．… それゆえ理論的考察は，実験データが核子内における点状電荷構造の振る舞いの証拠を与える可能性に絞られる．[16]

SLAC の理論家のジェームス・ビヨルケンは，理論的考察者の一人であった．1967 年 7 月のバレンナにおけるエンリコ・フェルミ国際物理スクールでの講義の中で，ビヨルケンは電子－陽子散乱を記述する理論式が高エネルギー領域に外挿すると，点状電荷による散乱式と似ていることを示した．彼

は求めた関係式が

…非常に理解しやすいために，歴史に照らし合わせて，核子の基本構成粒子の関点から解釈すべきである[17]

と信じた．

1968年9月下旬のフィジカル・レビュー誌に投稿された論文で，ビヨルケンはさらに，いかにして高エネルギー領域の非弾性電子散乱過程が“スケーリング”として知られる性質を示すのか，ということに言及した．

彼は，散乱過程がある物理量の次元によらず，ただエネルギーと電子－陽子間の運動量移行から得られる次元の比のみに依存することを示唆した．つまり，反応は特徴的な“スケール”を示さない．

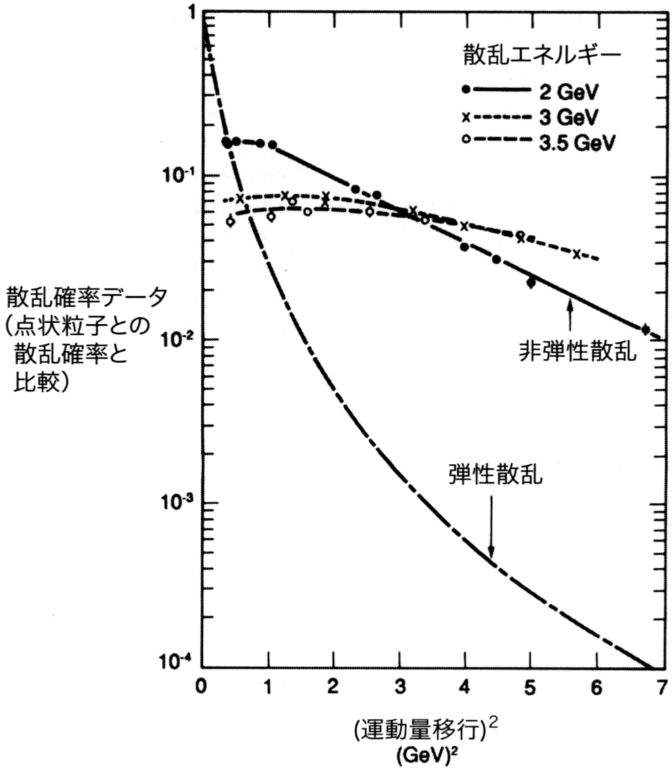
1968年の夏，リチャード・ファインマンはSLACを訪問した．彼はカリスマ性と素晴らしい才能を持った理論家で，1965年に量子電磁力学の発展に関する業績ですでにノーベル賞を受賞していた．1968年に彼は，陽子のパートン模型と名付けた研究をしていた．この模型においてファインマンは，陽子はそれぞれが陽子の運動量の一部を担うような多くの粒，パートンから構成されると考えた．そして，次のように説明した：

我々の知っている陽子を特徴づける量は，ある特種の部分（パート）が陽子の運動量の1部分（x）を分担する，統計的確率のような分布である．[18]

ファインマンは，強い相互作用をする粒子；パイ中間子，K-中間子，陽子の高エネルギー衝突現象と関連付けてこの模型を考察した．彼は研究の進展具合に失望していたが，SLACの新しい結果やビヨルケンのスケーリングの考えを知って，すぐにこの模型の重要性を察知した：

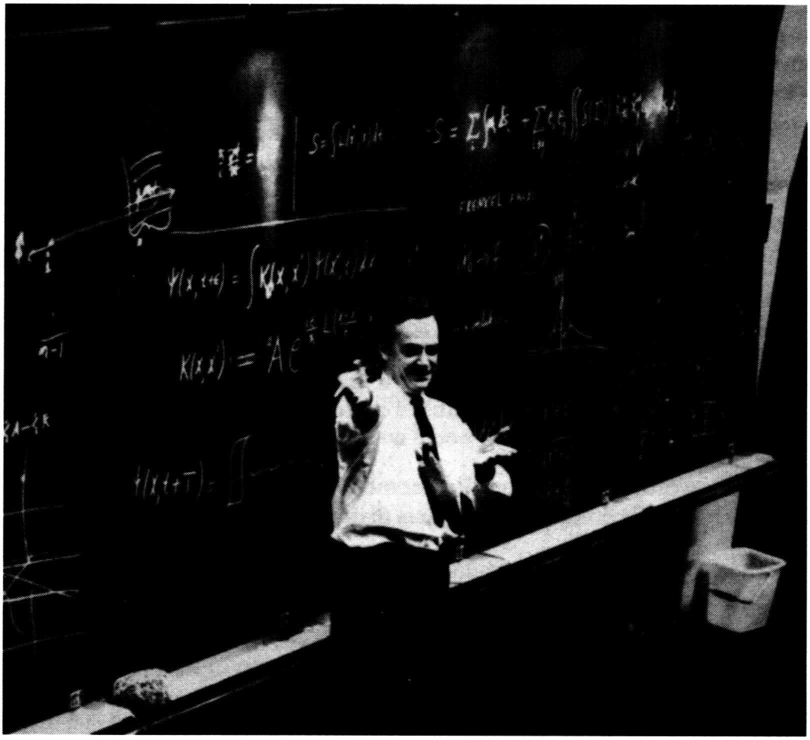
私は，実験がパートン研究を生み出し，仕立て，すでに強い相互作用に対して展開した描像を用いて，実験結果を容易に解釈できることがわかった．これらの実験結果は，パートンが何であるか，どのような分布しているかを決定することができる….[19]

ファインマンによれば，電子散乱実験を調べる簡便な方法は，陽子と電子が光速に近い速さで反対方向から進んでくるような，異なる座標系に実験を移して考えることである（素粒子物理学でよく使う戦術）．その時，陽子はそれぞれのパートンの並行な運動の流れとして扱う．そして：



図は，1969 年に SLAC の新しい線型加速器による電子ー陽子非弾性散乱（他の種類の粒子生成を起こす反応）の研究から，陽子の内部構造を示す最初の証拠となったデータ．電子が非常に高い確率で，陽子に大運動量を受け渡すことを示す．この現象から，電子は点状粒子と散乱していると解釈される．ここで，SLAC-MIT 実験の散乱確率データは，点状粒子との散乱確率との比として表わされている．この結果は，運動量移行とともに非常にゆるやかに変化していることがわかる．弾性散乱（新たな粒子生成を伴わない反応）の結果は全く異なった振る舞いを示す（図参照）．(Physical Review Letters 23, 935, 1969)

このような高い運動量（エネルギーと運動量は実質的に等価である）での衝突に対して，エネルギー・運動量保存則は単に粒子が運動量を互いに交換することを意味する．進行と逆方向に散乱する電子の運動量は，直接，散乱相手の粒の運動量に等しい … よって，散乱されて戻ってくる電子の運動量分布は，電荷粒（パートン）の運動量分布を与える … 電子は電気的に中性な粒と散乱しないので.[20]



1965年に講演中のリチャード・ファインマン．この年彼は，量子電磁力学の研究でノーベル賞を他の2名と共に受賞した注1．そして，3年後に陽子のパートン模型の研究に着手した．SLACの電子－陽子非弾性散乱実験から得られた興奮させられる新しい結果を理解するには，陽子の内部構成子としてのパートンが運動量の担い手となることを示唆する．(CERN 提供)

つまり，散乱電子の運動量の測定は，陽子内の粒が運動量を分担する様子を映し出す鏡を提供する．

ファインマンは多くの物理学者がうらやましく思うほど，物理学の基礎プロセスに対する洞察力を持ち合わせていた．そしてこの洞察力は，核心へ一直線にまい進し，何が起きているかを明瞭に表現することを可能にした．彼は電子散乱実験をミツバチの群れをレーダで観察することにたとえた：

注1 その中の1名は朝永振一郎氏.

もし，その群れが全体としてまとまって運動するなら，反射波の振動数は群れの速さを決定する．しかし，そうではなく個々のハチが群れの中でそれぞれ動き回っているなら，反射波はハチの速さの分布に対応するある幅の振動数を持つことになる．[21]

同様に，陽子によって散乱された電子は，陽子内の粒々の運動量範囲に相当する運動量分布を持つ．

パートン模型のもっとも重要な特徴の1つは，ビヨルケンの次元を含まない比に物理的解釈を与えたことである．この比は，ファインマンのパートン模型に現れる変数x，すなわちパートンによって運ばれる陽子運動量の分担量と同じものであった．

ファインマンはSLACにおける発見にすばやく対応し，ビヨルケンも同じく，ファインマンの提案にすかさず呼応した．エマニュエル（マニィー）・パスコスとの共同研究でビヨルケンは，1968年に発表した今では古典となった論文にパートンの概念を取り入れた．ジャック・シュタインバーガーは“我々には，序々にありがたみがわかって来た”と後で述べている．[22]

1968年に，パノフスキーがウィーンで紹介したSLACにおける非弾性散乱の最初の結果は，ある一面のみであった．しかしながら，キエフで1970年に開催された第15回高エネルギー物理学国際会議までに，SLAC–MITチームは測定を6つの異なる角度にふやした．これらの新しいデータは，広範囲の運動量移行領域に渡って“ビヨルケン・スケーリング”を証明した．シュタインバーガーは“今や，陽子が準自由な点状の構成子を持つという事実は確立され受け入れられた”と当時を思い出して語った．[23]

クォークとしてのパートン

【陽子の】パートン模型の驚くべき成功は，当然のことながら2つの疑問を提起する：パートンの実体は何か・・・そして，どうしてこのような素朴な模型が非常に有効なのか？[24]

ドン・パーキンス，高エネルギー物理学入門（教科書）

総合すると，データはまたパートンがクォークであるという可能性を強く支持する．このような解釈は，自由なクォークがまだ発見されていないため，いくつかの問題を呼び起こすとはいえ・・・[25]

ピータ・ランドショフ，1974年5月

ファインマンのパートンの存在が明らかになったとはいえ，パートンは果たしてゲルマンとツバイクによるクォークと同じ代物なのか？ 素粒子物理学者は，見え透いた結論に容易に飛びつくほど不注意ではなかった．その答えは最終的には，実験よって確かめられるだろう．要は，それに適した実験を行うことであり，またデータを正しく解釈することであった．

最初の勇気づけられる証拠が，SLAC の電子散乱実験からもたらされた．そのデータは，パートンがクォークと同じく，スピン 1/2 を持たなければならないことを示していた．一方，クォークの不可解な分数電荷についてはどうだろう？ クォーク描像では，陽子は電子の電荷量（e）の 2/3 を持つ正電荷の u クォーク 2 個と，− 1/3e 電荷の負電荷 d クォーク 1 個を持つ．パートンの電荷を測定し，それらが 1/3e や 2/3e の電荷を帯びていることを検証する方法があるのだろうか？ 実は存在する．それは電子散乱実験のデータを，別の実験手段で陽子内部を徹底的に調べる結果と比較することである．その手段とは，電子と同じようにはっきりした輪郭を持つ点状粒子として振る舞う，ニュートリノを用いる実験である．

巨大泡箱ガーガメルは，1972 年に非常に稀なミューオン・ニュートリノ反応の観測を始めた．その年はちょうど，SLAC で得られた結果の意義が十分に定着してきた時であった．ガーガメルを通り抜けるニュートリノは，時折，荷電粒子の束によるスプレー状に円弧を描く飛跡群を作る．それらの飛跡の 1 つが他の飛跡よりもより直線的である場合，この飛跡は質量の軽い高エネルギーのミューオンが走行したことを示す．このような，ミュー・ニュートリノが核子と衝突してミューオンに変化する荷電カレント現象は，SLAC で行われた非弾性電子散乱実験と等価である．

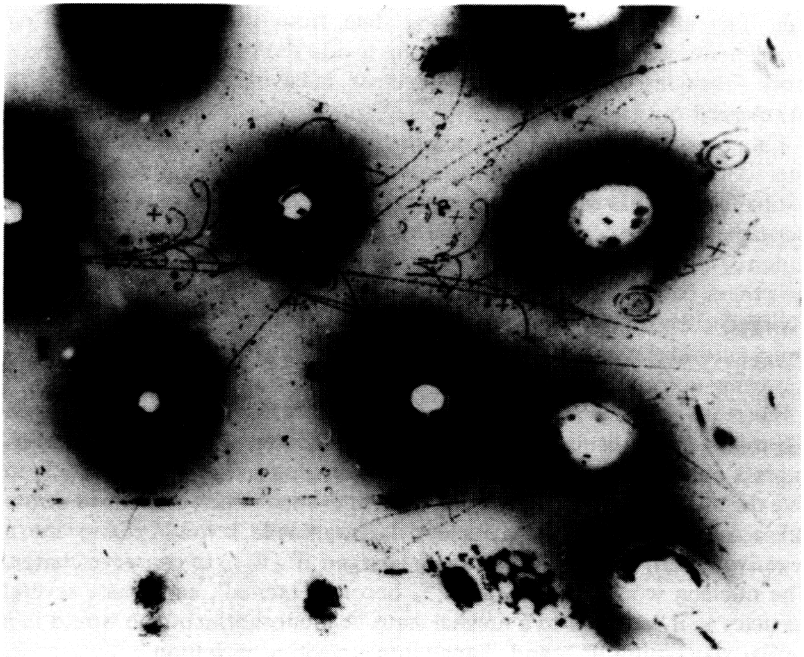
電子は電磁気力を介して（量子描像では光子の交換によって）陽子と相互作用する．しかしながら，ニュートリノの相互作用は非常に弱く，ほとんどが荷電 W 粒子を交換してミューオンを生成する荷電カレント現象を引き起こす．ミュー・ニュートリノがガーガメルの中で核子と非弾性散乱を起こすと，ニュートリノ自身は負電荷のミューオンに変わり，同時に，電荷が保存するよう正荷電の W 粒子（W^+）を放出する．核子はこの W^+ を吸収して励起

状態に移り，それが元に状態に戻る時に数個の粒子を放出する．反ミュー・ニュートリノは同様の反応過程において W^- を放出し，正電荷の反ミューオンに変わる．

では，クォークの階層では何が起きているのだろうか？“クォーク・パートン模型”では，陽子内部の2個のuクォークと1個のdクォークを，化学用語との類比から“バレンス（価）”クォークと呼んでいる．化学で価電子というと，元素の性質を決定する外殻電子のことを意味する．この命名は，粒子を構成しその性質を左右する3個のクォークを，クォーク・反クォーク対の一時的な“雲”または“海”（クォーク・パートン像によれば，粒子内部に埋没しているクォーク・反クォーク対の海クォーク）と区別するためである．これらの対は，電磁場内で電子・陽電子対が生じるように，パートン理論では陽子内部に存在する仮想場で絶えず作られる．そして，電子と陽電子が消滅するように，クォークと反クォークは容易に再結合する．

この描像においてニュートリノが陽子と散乱する確率は，陽子内のdクォークと全ての反uクォークが分担する運動量に依存する．このことは，ニュートリノがミューオンに変わり，電荷保存則により W^+ を放出する．そして，1単位の正電荷を持つ W^+ は，dクォーク（電荷 $-1/3e$）をuクォーク（電荷 $2/3e$）に，また反uクォーク（電荷 $-2/3e$）を反dクォーク（電荷 $1/3e$）にのみ変えることができる．同じように，W^- が役割を担う反ニュートリノの散乱確率は，uクォークと反dクォークによって決まる．そこでニュートリノ散乱と反ニュートリノ散乱の確率の足し合わせれば，陽子内の全u,dクォークと全反u,dクォークの寄与が得られる（ここでは，その他の重いクォークの寄与を無視する）．同じ議論が中性子との散乱に適用できる．

フレオンを詰めたガーガメルは陽子のみならず中性子も含有しているため，実験ではニュートリノによる陽子や中性子との平均的散乱のみ測定される．しかし，このことはいくつかの重要な発見に対して十分であった．まず，運動量分布の形は，電子散乱データの解析と同じ手法を用いて求めた結果と同じであった．しかし2種類のデータを比較すると，さらに新しい結果が導かれる．これは，電子がクォークの電荷の見ているので，散乱確率は電荷の2乗，すなわち，uクォークの4/9とdクォークの1/9に比例する．ファインマンは次のように補足した：

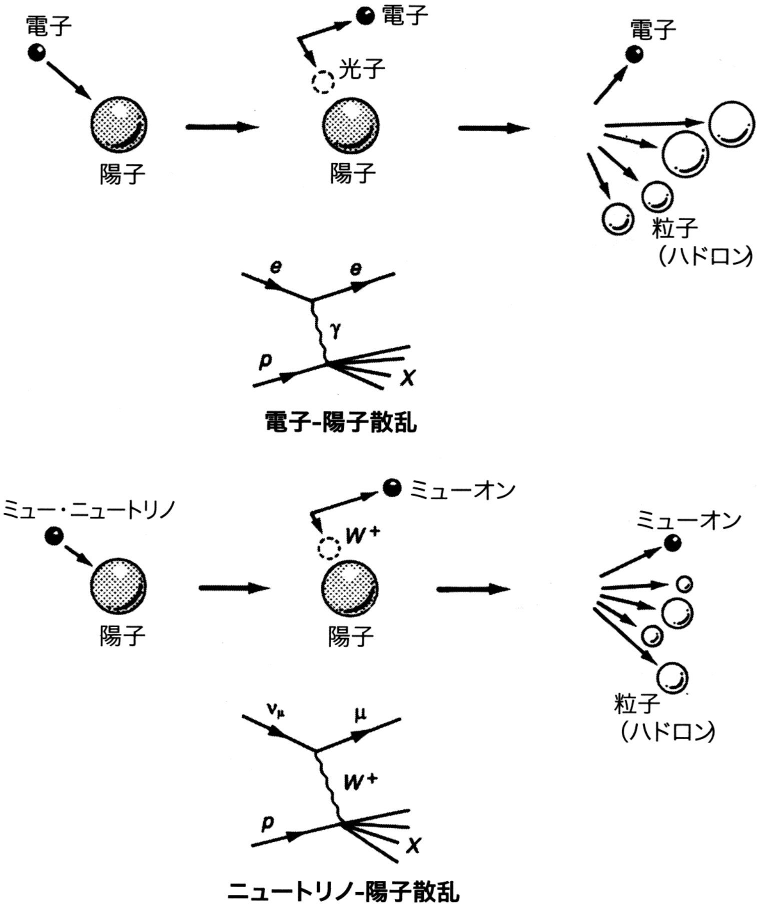


ガーガメルにおける典型的な非弾性荷電カレント反応．ここで，左側から入射したニュートリノは，液体中の陽子または中性子とW粒子を交換し，ミューオンとなって姿を現す．この写真の中で左端から右手に伸びる下から3番目の長い飛跡がミューオンである．大量のこのような現象の中から選び抜かれたデータは，パートン（陽子や中性子の内部構成子）が確かに分数荷電クォークであることの確立に極めて重要な役割を果たした．(CERN/マイヤーの提供)

あなたは，クォークが非整数電荷を持つという“ばかげたこと”を決して信じようとしないのなら，今まさに，ニュートリノ散乱と電子散乱とを比較することによって，最終的にクォークが非整数電荷を持つという考えが，物理的に意味あるものなのか，または物理的に確かなものなのかを …，初めて知る機会に遭遇しているのです.[26]

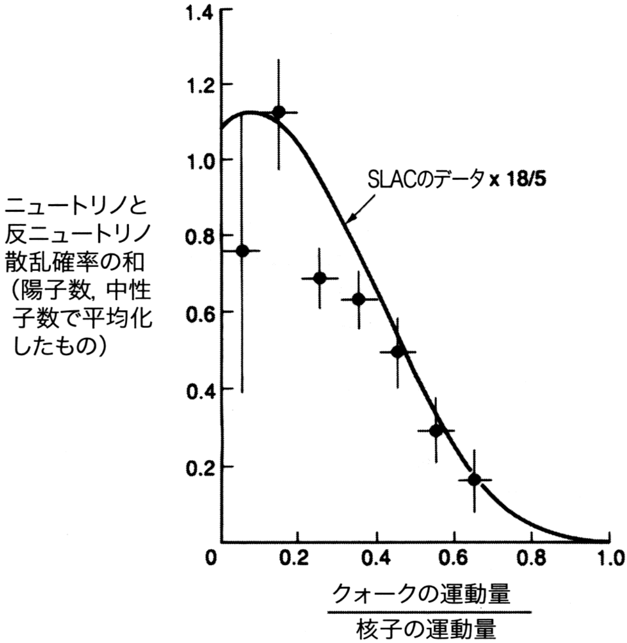
さらに，大家にふさわしい控えめな表現で，“胸がわくわくする”と言った．

異なるクォークの電荷の効果は，陽子と中性子との電子散乱を平均した確率に，$1/2(4/9+1/9) = 5/18$ の因子を持ち込む．そこでもし，ガーガメルから得られる運動量分布を 5/18 倍すると，SLAC の運動量分布のデータが再現されることになる．



電子ー陽子非弾性散乱において，電子は光子を媒介してエネルギーと運動量を陽子に転化する．そして，このエネルギーは種々の新しい粒子を生み出し物質化する．同様の過程がニュートリノの非弾性散乱においても生じる．この場合は，W 粒子がエネルギーと運動量を陽子に受け渡す．

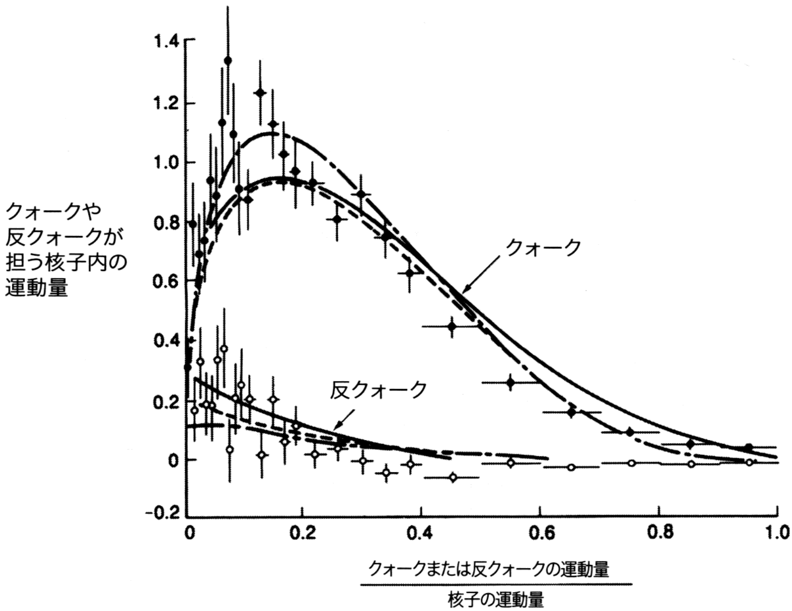
1973 年 8 月にハワイで開かれた会議でガーガメルの予備結果を紹介したチームの指導者ドン・パーキンスは，“全断面積は完全に分数電荷クォーク模型の予言と一致した”[27] と物理学者（ファインマンを含む）に告げた．彼は後で次のように述べた：



SLACの電子散乱結果とガーガメルのニュートリノ散乱結果との比較は，この2つの異なる粒子が核子内部の構成子による運動量の等分担を検知したことを示している．さらに，ニュートリノ散乱の結果が，電子散乱の結果を18/5倍したものと同じカーブ上に分布することは（図参照），我々に陽子内部の構成子が電荷2/3と-1/3を持つクォークである確かな証拠を与える．(Nuclear Physics B85, 269, 1975)

この証拠は，電子とニュートリノがクォークに割り当てられた電荷から予測される比に等しい絶対値のみ異なるだけで，まったく同じ核子の内部構造を見ていることを告げるものである.[28]

このように，陽子と中性子の内部に分数帯電した物質が存在する．しかし，ゲルマンとツバイクが提案した最初のクォーク模型は，陽子や中性子にそれぞれ3個のクォークを割り振った．クォーク－パートン描像では，これらは陽子における uud 価クォークと，中性子における udd 価クォークに相当する．我々はニュートリノによってこの3個の割り振り数を確かめることができるだろうか？ 驚くべきことであるが，おそらく答えは“イエス”である．



ガーガメルで得られたこれらのデータから（図参照），クォークが陽子や中性子内で反クォークよりも多くの運動量を担っていることが確かめられた．この結果は，陽子や中性子が3個の価クォーク，より詳細には価クォークを結合する強い力の場の中で，作られては消えるクォーク・反クォーク対の海の中に浮かぶ価クォークから構成される描像を確立した．図中の曲線はいろいろな理論的予測によるものである．(Nuclear Physics B85, 269, 1975)

この場合の確認方法は，ニュートリノと反ニュートリノによって測定された確率分布を差し引くことである．このことは，クォークと反クォークの運動量分布の相違を与える．つまり，核子内の全クォーク（q）数から反クォーク（$\overline{q}$）数を引いた数に依存するはずである．全てのクォーク・反クォーク対の“海”は，同数の q と $\overline{q}$ を与えるため，差（$q-\overline{q}$）は価クォークの数に相当する．再びガーガメルで得られた予備結果は，差（$q-\overline{q}$）が確かに3であることを示し，クォーク・モデルを支持した．

ニュートリノ実験の結果を用いる3番目の検証は，核子の運動量の中で，全てのクォークと反クォークが持ち運ぶ運動量の割合を調べることである．この知見は，再びニュートリノと反ニュートリノ双方の測定結果を組み合わせ

て得られる（また，非弾性電子散乱のデータからも引き出せる）．もし核子がクォークと反クォークのみから構成されていれば，それらが運ぶ運動量分担の足し算は1となる．しかし，実験結果は約0.5ほどであった．クォークと反クォークが担う運動量は，わずか半分であるかのようである．陽子や中性子の内部には，まだ他の何かが存在しなければならない．そしてこの他の何かは，電子やニュートリノ両方と相互作用しないはずである．つまり，電磁気力や弱い力を感じない何かである．

この結果は，それほど驚くべきことではなかった．そもそも何かが，クォークを核子の中に束ねておく必要があった．ファインマンは次のようにコメントした：

> ようするに，全ての運動量がクォークによって占められるとすれば，それは困ったことになるだろう．我々は，クォーク同士の相互作用を記述する方法を知らないのかもしれない．[29]

素粒子物理学者は，陽子と中性子を原子核内に閉じ込めておくような幾つかの原子核相互作用が弱い力の効果よりはるかに強く，また荷電粒子間に働く電磁気力よりももっと強いことを知っていた．他に何が，原子核をまとめることができるのか？ 原子核はなぜ，同符号電荷の陽子同士に働く斥力によってバラバラにならないのか？ おそらく，クォークを束ねているものが何であれ，強い核力が根源にあるようだ．

場の量子論によれば，電磁場が光子によって，弱い力がW粒子やZ粒子によって伝達されるように，クォーク間に働く力も場の粒子によって媒介されるはずである．このクォーク間力に対して，誰かが“グルーオン（糊粒子）”という名前を造りだした．SLACとガーガメルでの実験結果は，核子内部のクォーク間を飛び交うグルーオンの実在を，初めて暗示するものであった．

巨大な足跡ー結末

・・・空白とは，歴史に与えられた瞬間である．我々は常に前進している・・・[30]

リチャード・ファインマン，1974年4月

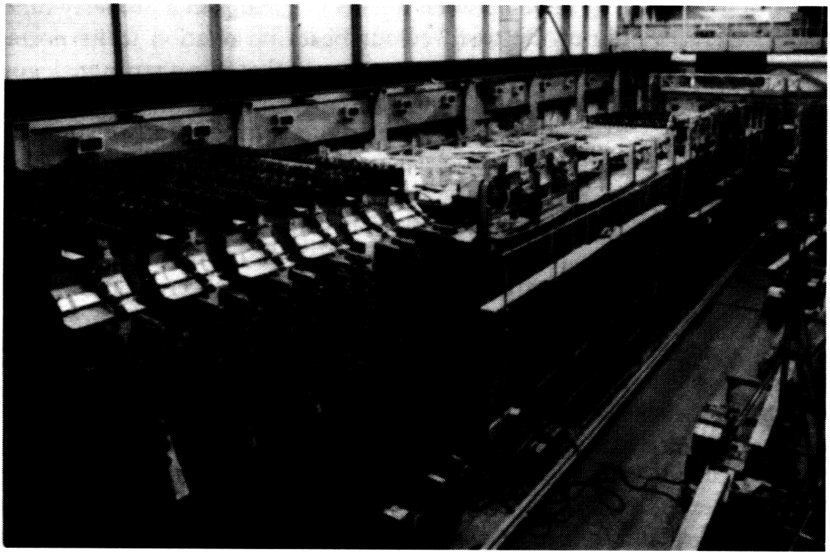
ガーガメル実験はある意味で，橋渡しの役割を果たした．それは1960年

代の古い物理学と1970年代の新しい物理学を結びつけた．すなわち，それぞれ別々の力によって結合している多くの種類の素粒子がひしめき合う世界から，1つの根本的な力で統一された基本的な素粒子構成要素を示唆する世界へと素粒子物理学を導いた．現在，我々はガーガメルが集めたわずか一握りのニュートリノ散乱物が，自然の本質の一端を暴いたことを知っておりこの実験に焦点を絞っているが，当時は必ずしもそれほど明白ではなかった．

ニュートリノ・ビームを用いる実験は，困難の連続である．ビームを検出することができないだけでなく，引起されるあらゆる相互作用が極めて稀で，招かざる客のバックグランド現象の影響で忙殺される危険性がある．ガーガメルでは過去・現在・これからのニュートリノ実験と同様，物理学者はバックグランドの影響を計算する方法について，また見えないニュートリノ・ビームのエネルギーとビーム強度について，さらに種々の検出器の検出効率について等々の実験手法を議論した．このような議論は，あらゆる素粒子物理学の実験につきものであるが，ニュートリノ実験の場合，議論が白熱しこれを鎮めることが非常に難しく，強情な自己主張者の間での感情的なやり取りを増長する可能性が十分あった．

“今，あなた方は見つけたと言っているが，それは間違いだよ”というような中性カレントの顛末，つまりフェルミ研究所での出来事は，ニュートリノ実験で持ち上がる論争のもっとも良い例である．しかし，それはまた，偉大な発見というものが実験上の大きな挫折とも思えることから，どのようにして産まれるのかを実際に示している．ガーガメルとフェルミ研究所の最初の結果が出て以来，主にCERNとフェルミ研究所において，中性カレントのより詳細な多くの研究が実施された．そして，数多くの実験結果が1976年に稼動したCERNのスーパー陽子シンクロトロン（SPS）から輩出された．フェルミ研究所の初期の加速器と同じく，SPSは陽子を450 GeVのエネルギーまで加速し，これを用いて高エネルギーニュートリノ・ビームを生成できた．長年に渡ってそこに陣取っている数々の検出器（1976年に低エネルギー加速器（PS）から運ばれてきたガーガメルを含む）によって，ニュートリノ反応に関する大量のデータが蓄積された．

1970年代の終わりまでに，これらの実験はサラムとワインバーグによって提案された電磁弱理論にゆるぎない支持を与えた．そして1979年にこの2人



1970 年代後半から 1980 年代に CERN で行なわれた幾つかの新しい実験は，ラムが作った測定器とガーガメルとを組み合わせて，さらに高エネルギーのニュートリノ散乱の研究を目指した．CHARM − II と名付けられた実験（写真）は 1986 年に始まった．この実験の主な目的は，非常に稀に起こる電子・ニュートリノ散乱の精密測定であった．この写真の後方部は，ニュートリノ標的用の 692 トンのガラスを粒子検出器で幾重にも挟んだものであり，前方部はミュー・ニュートリノによって生成されるミューオンの検出・測定を行う．(CERN 提供)

の理論家は，クォークの弱い相互作用を電磁弱理論に組み入れる方法を考案したシェルダン・グラショウと共にノーベル物理学賞を受賞した．（グラショウの仕事は 1971 年に，当時まだ検出されていなかったチャーム・クォーク，c の必要性を指摘することになった.）1970 年代後半の実験は，電磁弱理論が陽子の直径の 1/1000 に相当する 10^{-16} cm の近距離まで有効であるか否かを検証する精密測定を目指した．

クォーク・パートン模型の発見に関する限り，ガーガメルの初めの結果はこの模型を考察することが間違っていないことを示唆するものであったが，その当時は，陽子の心臓部の深いところで何が起こっているのかを記述する電磁弱理論のような，基本的な場の理論がなかった．はっきり言って，クォーク・パートン模型のこれほどまでの成功は異常に見えた．パートン描像は，入

射電子またはニュートリノが陽子内の1個のパートンと反応し，他のパートンを無視するものと仮定する．しかし，クォークはグルーオンを媒介して強く結合していると考えられた．そこで，もしパートンがクォークやグルーオンであるなら，なぜパートン間の相互作用は“スケーリング効果”に影響を及ぼさないのか？ このことは，大運動量移行によって深部を調べると，パートンの結合力は非常に弱く見えることを意味する．では，どんな種類の力が一方で十分強くなり，そのためクォークが核子から放り出されずに引き留めるのか？

大運動量移行，すなわち陽子や中性子内の近距離で見かけ上，力が弱くなるということは，重要なヒントであった．1973年の初めに幾人かの理論家達は，このような現象がある種の場の理論において必然的に導かれることを示した．そして，この研究が以後数年に渡って展開された量子色力学（QCD：強い力の量子場理論）の引き金となった．

QCDではクォーク間に働く強い力は，カラーと呼ばれるクォーク固有の性質から生じる．ここで，カラーという言葉を使用しているが，このことは色そのものの意味と何ら関係なく，粒子が電荷を持つことと同じ意味合いで，クォークの特性を表すものである．電荷が荷電粒子の回りに電場を作ることとまったく同様に，カラーはカラー場，つまり強い力の場を引起す．

カラーの名前の由来は光の原色と同じく，クォークが異なる3種類の性質を持っていることから来ている．この点では，電荷と対照的である：電荷は1つの形態のみで，我々が正・負電荷と呼んでいる性質は，電荷・反電荷の効果にまとめられる．原子が負電荷の電子と正電荷を持つ原子核から構成されているとはいえ，全体で電気的に中性になっているように，クォークからできている粒子も全体で中性カラー（無色）でなければならない．3個のクォークで構成される陽子は，カラーの合算によって無色になるように3種類それぞれ別々の色のクォークでなければならない．また，反陽子は3種類の反カラーをまとった反クォークから構成される．(カラーのもともとの発想は，ある種の粒子がなぜ3個の全く同じクォークのみから作られているのか，すなわち量子論の基本原理であるパウリ原理を破っているかのように見えることを説明する試みから導かれた．)

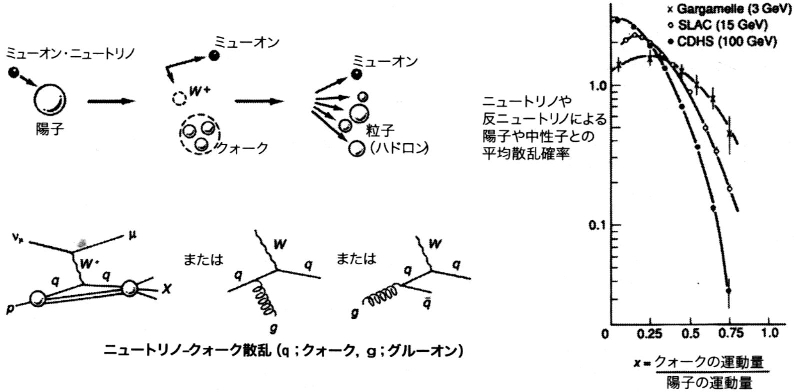
カラーは3種類あるために，強い力の量子キャッチボール・ゲームのボー

ル役であるグルーオン自身は，8種類の異なるカラー状態が存在しなければならない．すなわち，グルーオンにもまたカラーがある．(厳密に言えば，グルーオンはカラーと反カラーの混合状態を保有する.) このことは，量子電磁力学における光子が電気的に中性であることと大違いである．このため強い力は他の力と根本的に異なる振る舞いを示す．グルーオンはクォーク間を行き来し，クォークのカラーを変えるのみならず，グルーオン同士で互いに反応を起こすこともできる．次のような比較が役に立つであろう：光子の流れである光のビームは互いに干渉せず空間を突き進むけれども，グルーン・ビームはそれぞれ相互作用するためそれほど遠くまでは進まないだろう．

グルーオンのこのような振る舞いは，なぜクォークが核子の中から単独で抜け出すことができないのか，また核子内部にいるクォークを高運動量粒子によって近距離に接近して覗くと，互いに影響を及ぼしあっていないように見えるのかを理解する手助けとなる．

グルーオンによる効果は，電子やニュートリノによる非弾性散乱実験で検出できるだろうか？ 答えは“イエス”である．なぜなら，グルーオンは核子の構成子に運動量を分配する割合を修正することができるからである．グルーオンはクォークと反クォークに分離し，そして，探査役の電子やニュートリノはこれら2つ（クォークと反クォーク）の一方と散乱を起こす．一方クォークはグルーオンを放出し，探査役電子やニュートリノと散乱する前に運動量を失う．これらの現象は陽子内部にさらに深く入りこんで，つまり大運動量移行散乱で調べるとより顕著になる．このような二次的反応はパートンの平均運動量を小さくするように働く．そして，運動量分布の測定結果は変化し，そのため，スケーリングはもはや厳密には成り立たなくなる．つまり，分布は単に次元のない量 x に依存しなくなり，陽子のより小さなスケールを調べるようと探査粒子のエネルギーを増加させると，それとともに変化する．

グルーオンによる修正効果の最初の証拠は，電子やニュートリノによる実験ではなく，核子を調べるために高エネルギー・ミューオンを用いたフェルミ研究所の実験によってもたらされた．一般的に，核子とミューオンの間の運動量移行依存性が鈍くなるという結果は，電子とニュートリノによる実験と一致していた．しかしながら，運動量移行の大きい所で，通常のスケーリング効果と異なる小さいながら有意な差異が確認された．



高エネルギー領域において強い相互作用の媒介粒子であるグルーオンは，陽子内部に存在するクォークがその運動量を分担する描像にさらに変更を加える．W粒子を吸収してニュートリノと相互作用する直前にグルーオンを放出するクォークは，他のクォークよりも小さな運動量を持つことになる．その上，高エネルギーではグルーオンはそれぞれがその運動量の半分を担うクォーク・反クォーク対をより頻繁に形成する．この両方の効果はともに，クォークがより小さな運動量を持つ方に押しやる．ガーガメル，SLAC（電子ビーム），CERN-ハイデルベルグ－サックレイ実験（CDHS）から得られた，エネルギーの増加に伴って変化する散乱確率の結果を比較することによって，容易にこの効果が検出できる．

その後，高エネルギー・ニュートリノビームによる測定でも，運動量移行の大きいところで，スケーリングからゆっくりと変化する同様のズレを検出した．ニュートリノとミューオンの双方の実験結果を量子色力学の予測と照合することによって，研究者はグルーオンの運動量分布を求めた．その結果，グルーオンは核子の運動量の僅かな部分－xの小さい値－を受け持ち，しかし，数が多いため全体では陽子の全運動量の半分を担っていることが判った．

グルーオンに関するこれらの結果は，ニュートリノ実験が探り出した陽子内部の全体像のほんの一部分である．特に，ニュートリノの巻き方，すなわちヘリシティは特別な役割提供した．それは，ニュートリノがクォークと反クォークに対してそれぞれ異なる相互作用を引き起こすことを意味する．このことは，核子内部のクォーク・反クォーク対の海の中に潜んでいる反クォークの運動量分布を調べることを可能にする．グルーオンと同様，これらの反クォークも，全体の運動量の一部分を担っている．

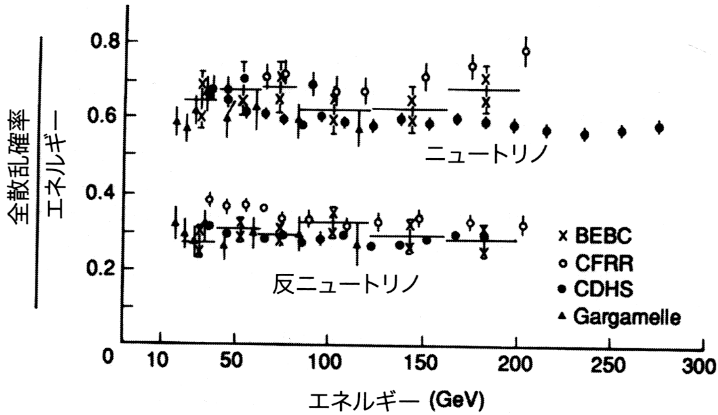
結局のところ，“ニュートリノで素粒子を覗く”成果は，2 GeV～200 GeV に渡る広範囲のニュートリノ・エネルギーにおいて，陽子内部の点状構造に対するもっとも明確な証拠を提供した．パーキンスの言葉を借りれば：

多分，ハドロンの構成子の性質に関するもっとも劇的な実証は，ニュートリノ・核子散乱の入射エネルギーとともに変化する全反応断面積によって与えられた．その結果は単純な形をしており，ニュートリノのエネルギーとともにほぼ直線的に増加する断面積を示す．これは複雑なハドロン生成過程を，ニュートリノと点状粒子との弾性散乱で置き換えることから期待される結果とぴったり一致する．[31]

点状粒子とは，反応確率に影響を与えるような構造を持たない粒子を意味する．すなわち反応断面積は，単に弱い力の強さと反応に寄与するエネルギーのみで表すことができる．ニュートリノによって得られたデータは，高エネルギー領域においても，クォークがまだ点状に見えることをはっきりと示している．エネルギーによる唯一の変化があるとはいえ，その大きさは非常に小さく，量子色力学におけるグルーオンによって完全に説明できる．(CERN でコリン・ラムの重液体泡箱による測定結果が，SLAC における最初のスケーリング現象検出の数年前に，この単純なエネルギー依存性の証拠を見つけたことに注目すべきである．当時は誰一人，単純な粒子像を持つ核子の立場から，ニュートリノ・データを解釈しようとしなかった．原子核が複雑な構造を持つという，一般的に信じられていたことを疑わなかった.)

ニュートリノがクォークの性質を探ることに役に立ったもう 1 つの研究は，重いクォーク：チャーム（c）とビューティ（b）を含む粒子生成を研究する実験であった．これらのクォークは，ゲルマンやツバイクが最初に提案したクォーク描像に含まれていたものではなく，1970 年代に高エネルギー実験において作られた新粒子の中から発見された．c と b クォークは，核子を構成する u，d クォークよりもずっと重く，そのためこれらのクォークを構成要素とする粒子はさらに重い．このような粒子は 10^{-12}～10^{-13} 秒の短寿命の後に，軽い粒子，すなわち軽いクォークからできている粒子に崩壊する．これらの崩壊では，c，b クォークは弱い相互作用によって，中性子のベータ崩壊と類似の反応過程を通してストレンジ（s）クォークに転換する．

いろんな種類の実験によって，c クォークや b クォークを含む粒子の生成，崩壊の研究が行われ，ニュートリノ実験はその特有の性質を武器に，他の実

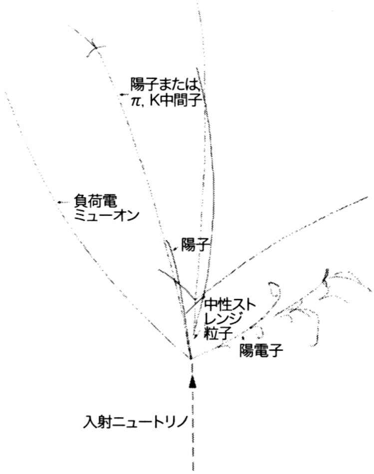


ニュートリノ（反ニュートリノ）と核子の全散乱確率をエネルギーで割った量は，これまでの研究から高エネルギー領域で一定値になる．すなわち，全散乱確率は単にエネルギーのみに依存する．このことは実験で到達できる最大エネルギー領域まで，核子が単純な点のように振舞う物質から構成されていることを顕著に示す証拠である．（データは 4 つの別の実験から得られたものである）

験と相補的な役割を演じた．例えば，チャーム（c）クォークが反チャーム・クォーク($\bar{c}$)を伴わない粒子，つまりチャーム粒子の崩壊を示す最初の幾つかの現象例を検出した．

1975 年の初め，c クォークが J/ψ（c と $\bar{c}$ の束縛状態）と呼ばれた粒子から発見された次の年に，ブルックヘーブン国立研究所のニック・サミオスの実験チームは，c クォークと 2 個の他のクォークから構成されたチャーム粒子を発見したと報じた．彼等の実験は，ニュートリノ・ビームを 2 m 水素泡箱に入射させるものであった．翌年ガーガメルとフェルミ研究所の 5 m 泡箱は，チャーム粒子とおぼしき粒子を数例見つけた．

しかしながら，ニュートリノ・ビームを用いる実験の時代は，いまや大方終わろうとしていた．ガーガメルは一線から退き，唯一の大型測定器が CERN のニュートリノ・ビームラインに残っているのみであった．素粒子物理学者が電磁弱理論や QCD，これらを統合した素粒子標準理論の予測を検証するために，より高エネルギーに目を向けるにつれて，違ったタイプの実験が行われるようになった．特に，リング状加速器の中で 2 つの粒子ビームを互い



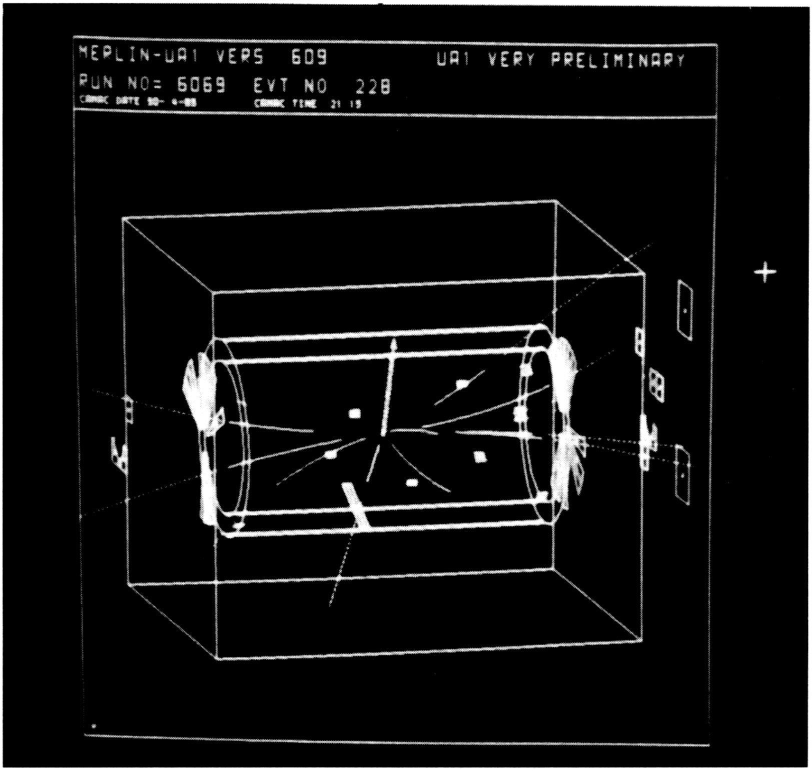


ガーガメルで撮影されたこの写真は，チャーム粒子（チャーム・クォークを含む粒子）の生成と崩壊を示している．チャーム粒子は泡箱内で飛跡を残すほど寿命が十分に長くなく，陽電子と中性ストレンジ粒子への崩壊によって検出される．ここで，中性ストレンジ粒子は特徴的なVの字型の飛跡対を生成して，2個の荷電粒子に崩壊する．（CERN/マイヤー提供）

に反対方向に周回させて衝突させる衝突型加速器によって，研究者は長年追い求めてきた荷電W粒子やその相棒の中性粒子，Z_0を作り出すのに十分なエネルギー領域に到達できた．

物質を直接視き，探査するというニュートリノの役割は，素粒子衝突加速器の研究対象に対してもしばしば脚光を浴びたとはいえ，今やずっと過去のことのようである．もちろん，粒子の衝突によって生成されたニュートリノは飛跡を残さない．しかし，パウリのニュートリノ仮説をもたらしたベータ崩壊の実験のように，ニュートリノの存在は，例えばそれが持ち出すエネルギーのために生じる明らかな不足・欠如によって暴露される．

1984年，CERNにおける陽子－反陽子衝突実験で明らかに反対側の運動空間とのエネルギー不均衡を示す，1方向に飛び出した高エネルギー・ミューオンまたは電子を伴う偏った現象が数例見つかった．“片手でたたくドラムの



W 粒子の崩壊は，CERN の UA1 実験で測定された粒子群の飛跡を計算機で空間再構成することによって検出された．W 粒子は，測定器の中心で起こる陽子と反陽子の消滅反応で生成され，時計の 7 時の方向に走る飛跡を持つ粒子とニュートリノに崩壊した．ニュートリノは飛跡を残さないが，消滅反応で生成された全ての粒子のエネルギーと運動量を足し算し，それらの不足分を計算することによって検出器を素通りする粒子が求められる．この写真は，検出器の左上方に（＋印の方向）粒子が飛び出したことを示している．

音のようだ" と当時，誰かが言い表した．これらの現象は，W 粒子がレプトン数を保存するようにニュートリノを随伴して，電子またはミューオンに崩壊する現象を示すものである．荷電粒子のエネルギーと見えないエネルギーを足し合わせると，電磁弱理論からの予言と見事に一致する W 粒子の質量を与える．

CERN，フェルミ研究所，SLAC での衝突型加速器による最近の実験にお

いて，物理学者は新粒子や新しい反応過程を示唆する，幽霊粒子・ニュートリノが暴き出す現象を追い求めている．これらの高エネルギー実験の目的は，宇宙開闢の瞬間に物質がどのような振る舞いを演じたのかを解明することにある．ニュートリノはもはや我々が原子核を調べるために送り込んだ刺客ではなく，それは，物質の起源についての重要な情報を携えて原子核の内部空間から飛び出して来るメッセンジャーである．

第6章
太陽を覗く

ニュートリノは星を構成する大量の遮蔽物質の中を通り抜け，“その中心部がどのようになっているのか？”，それを調べる唯一の手段を提供してくれる．このニュートリノによってもたらされる情報は，太陽光と同じく輝く流れに乗って，絶えず私たちのもとにやってくる．にもかかわらず，このニュートリノはいまだに検出されていない．[1]

フィリップ・モリソン，1962年

太陽はなんの変哲もない，ありふれた星である．アーサー・エディントンは，「星の社会では，まあ並の中流階級といったところ」[2] という．だが，太陽は限りなく興味深い．地球に一番近い星として，私たちがもっともよく理解している星，それだけではない．むしろ，地球上の生命を育むエネルギーを生み出す仕組みが太陽内部に備わっていることが，私たちを惹きつけてやまない．私たちが目にする太陽光は，太陽の表面層だけからやってくる．しかし太陽を一生涯輝かすエネルギーはずっと奥底の，高温で高密度の太陽中心核に埋没している熱核融合炉によって作られる．

太陽光は，その表面から地球までの1億5千万キロメートルを，8分かけてやってくる．この太陽光がもたらすエネルギーは，太陽表面からわずか70万キロメートル内側にある太陽中心から旅立ったもので，約100万年も前に生成されたものである．太陽表面に達するまでにこのエネルギーは，高温でガス状の内部の物質と無数回の反応を経由して，吸収と再放出の繰り返しを

受ける．したがって私たちのもとに届く光は，太陽の燃焼を制御している熱核融合反応とは，ほとんど無縁の光といえる．

これで話が終わりなら，太陽の中心部を私達は永久に覗き込むことができないだろう．ところが，幸いにもそうではない．全体の約2%にすぎないとはいえ一部の太陽エネルギーは，光とは別の媒体によって持ち出される．その媒体はガス状の物質の中を，あたかもなにも存在しないかのように直進し，わずか3秒で中心部から表面に到達する．このエネルギーの運搬役がニュートリノである．太陽ニュートリノの流束は地球に影響されることなく，昼は上空から降り注ぎ，夜は地球を貫通して吹き上がり，常に私たちの体の中を通り抜ける．そして，何よりも心ときめくことは，太陽ニュートリノが太陽の心臓部で生成された時の痕跡をとどめているからである．もし，太陽の内部を覗こうとするなら，太陽ニュートリノは中心部を映し出す唯一の鏡を与えてくれるだろう．

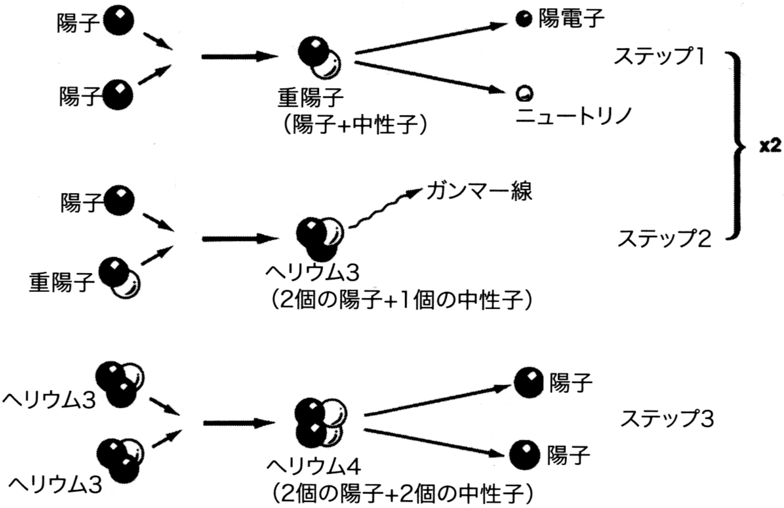
太陽炉

ケープコッドの海岸で夏の日光浴を楽しむ人たちは，8光分（光速で8分）のかなたで起こっている莫大な原子核反応から生まれる威力を，知らないうちに満喫している[3]

ハンス・ベーテ，1980

太陽は，最も軽い元素である水素の原子核を，2番目に軽いヘリウムの原子核に転換することによって燃焼している．この転換が起こるたびに，太陽は25 MeVのエネルギーを放出する．25 MeVといえば，かろうじてアメーバを動かすことができる程度の量だが，反応は毎秒とてつもない回数起きているのでそれが積もり積もって太陽をずっと輝かせておけるだけの量となる．

そのエネルギー源は，太陽の始源物質である水素原子核の質量の中に潜んでいる．太陽内部における水素からヘリウムへの転換は，幾つかの段階をへて進行するが，最終的には4個の水素原子核（つまり陽子）から2個の陽子と2個の中性子で構成されているヘリウム原子核1個を作る．ヘリウム原子核内では，4個の構成粒子は互いに非常に強く結びついているため，ヘリウム原子核の質量は，転換前の4個の陽子の総質量よりも小さい．この差が25 MeV



陽子-陽子連鎖反応

太陽エネルギーは，水素がヘリウムに転換することによって生じる．基本的な反応は，2個の陽子（水素原子）が重陽子を作り，次に，重陽子が他の陽子と反応してヘリウム3（質量数3のヘリウム）を作る．そして，安定なヘリウム（ヘリウム4）を作るには，2個のヘリウム3の反応が必要になる．ヘリウム4は，2個の中性子と2個の陽子から構成されている原子核である．3番目の反応が進むためには，最初の2つの連鎖反応が2回起きなければならないことに着目．

であって，この差分は転換の全過程に関与する粒子によって，主として運動エネルギーの形で持ち出される．

この水素燃焼で最も特徴的なことの1つは，最も非力な原子核反応である弱い相互作用によって燃焼が起きる点である．転換過程の第一段階は，ベータ崩壊と同様の反応をへて進行する．陽子は他の陽子のごく近傍で中性子に転換し，その結果，中性子と陽子は結合して重陽子（重水素として知られている原子核）を作る．陽子から中性子へと変換する際，陽子の電荷を引継いだ陽電子と，いつのまにか痕跡を残さずに立ち去って行く第4番目の役者が生成される．この役者が電子・ニュートリノで，平均エネルギー 0.26 MeV を持って太陽の中心部から孤独な旅路に出る．

しかしながら，最初の 2 個の陽子は弱い相互作用が働く前に．互いに十分接近しなければならない．そのためには，陽子間に働く電気的斥力をなんとかして克服する必要があるが，それは，“トンネル効果”として知られている量子力学的過程を通してのみ起こる．太陽中心部の 1 千万度の高温状態にあっても，陽子の持つ熱エネルギーだけでは，電気的斥力に打ち勝つことは難しい．

実際に太陽が燃えているということは，量子トンネル効果と弱い相互作用の 2 つの作用のおかげである．しかも，太陽が現在も燃え続けていることは，これらの 2 つの作用がいずれも稀にしか起こらないためである．この基本的な核融合反応が起こる確率はきわめて小さい．太陽中心部は鉛の 10 倍の密度とはいえ，陽子が他の陽子と結合して重陽子を作るまでに平均 100 億年はそこに居座り続けなければならない．私たちは，反応過程が非常に弱いことに感謝しなくてはいけない．もし，太陽の燃焼がもう少し速かったなら，太陽系は約 45 億年前に形成されたと考えられているので，太陽はすでに水素を完全に燃焼しつくし死期に入っていただろう．

太陽は比較的ゆっくりと燃えているとはいえ，毎秒 10 億のさらに 10 億倍の電子・ニュートリノが，太陽中心部から群れをなして巣立っていく．太陽表面の輝度測定値 $=3.86\times10^{26}$ ジュール/秒，ヘリウム原子核が 1 つ生成されるごとに放出されるエネルギー $=25\,\mathrm{MeV}$（4×10^{-12} ジュール），そうすると，大雑把にいって，毎秒 10^{38} 回の転換が起こっている計算になる．ヘリウム原子核を形成するには，2 個の陽子が中性子に転換しなければならないので，転換が 1 度起こるごとに 2 個のニュートリノが生成される．したがって，ニュートリノは毎秒，約 2×10^{38} 個生成されている．ニュートリノは四方八方に飛び出るため，そのほんの一部，つまり 10^{11} 個につき 35 個が地球にやってくる．そして，ほとんどが何物にも邪魔されずに通り抜けていく．ということは，毎秒約 7×10^{28} 個のニュートリノが太陽に向き合う地球の表面にやってきて，反対側から抜け出て行くわけである．すなわち，毎秒 $1\mathrm{cm}^2$ 当たり，約 6×10^{10} 個のニュートリノが通過している．

これらのニュートリノを，私たちは捕まえることができるだろうか？ 太陽の中心部を直接“のぞく”ことにニュートリノが使えるのだろうか？ 答は原理的には“イエス”である．しかし，困難が立ちはだかっている．ニュートリ

ノが使者として，太陽の中心部から地球に到達することができる理由こそが，ニュートリノをほとんど捕えることができない理由となっている．ニュートリノと物質との相互作用は弱い．だから，ニュートリノは太陽から素早く脱出できる．しかし，それがまた実験物理学者にとって，手のほどこしようのない頭痛のタネにもなる．太陽からのニュートリノを検出するには，生涯を捧げるだけの不屈の精神をもっていなければならない．

そのような研究者の一人がレイモンド・デービスである．1967 年に彼は，太陽から絶え間なく飛んでくるニュートリノを測定する後世に名を残す実験を開始した．この実験は以後，ずっと継続されている．1988 年まで，この実験は太陽ニュートリノを測定したと言い切れる唯一の実験であったが，その結果は，多くの議論と疑惑を引起した．実験によって測定されたニュートリノの量が，25 年に渡り一貫して太陽標準理論から予測されるよりも少なかったのである[注1]．

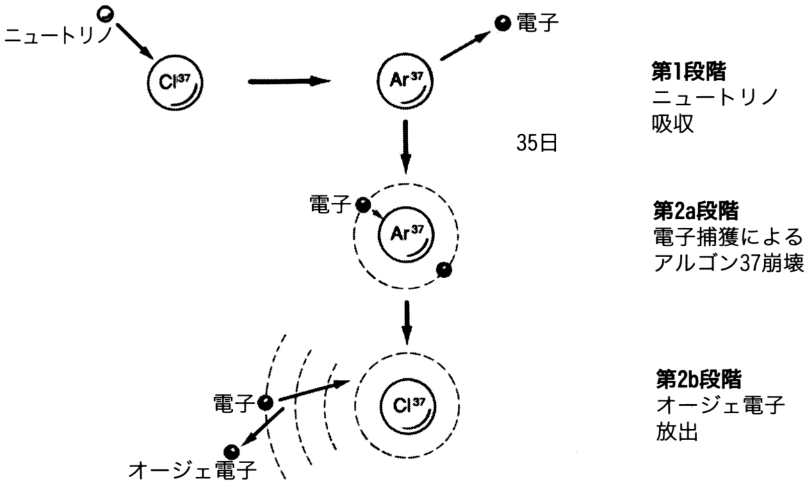
七転び八起き

1960 年当初，どう見ても経費のかかるこの実験は天文学者の間でそれほど関心をよんだわけではないし，観測によって実際に太陽ニュートリノの検出成功を期待する強い理由もなかった．[4]

ジョン・バコール，レイモンド・デービス，1982

デービスは 1955 年に，太陽ニュートリノに関する最初の検出結果を公表した．ちょうどその頃，彼はスピン 1/2 を持つ粒子に対するディラック理論が教えるように，ニュートリノと反ニュートリノが異なる粒子であるかどうかを調べる検出器の開発に励んでいた．1930 年代にエトーレ・マヨラナが，ニュートリノと反ニュートリノが同一粒子である可能性を最初に指摘し，1949 年にブルーノ・ポンテコルボが原子炉から発生する反ニュートリノを，ドライクリーニング液である四塩化炭素を満たした大型タンクを用いて検出する方法を提案した．それについては第 3 章に詳述してある．

注 1　塩素実験は 1995 年まで継続され，本書に後述されているように太陽ニュートリノ欠損現象を発見・確立した．レイモンド・デービスはニュートリノによる天文学の開拓への功績により，2002 年度ノーベル物理学賞を日本の小柴昌俊氏と共に受賞した．



塩素実験

塩素実験では，ニュートリノは 2 段階の反応過程をへて検出される．第一段階では，塩素 37 の原子核はニュートリノを吸収してアルゴン 37 に変わる．その時，同時に電子を放出する．第二段階は，35 日の半減期を持つ遅い反応過程である．ここでは，アルゴン原子核は近くの軌道電子を捕獲して，より安定な状態の塩素 37 に戻る．しかし，この反応は原子内の電子軌道に空孔を残す．このため，空孔より外側の軌道にいる電子は落下して，この空孔を占有することができる．この時，放出されるエネルギーは，第 3 番目の電子を原子の外にたたき出す．この特定のエネルギーを持つ電子を検出すればアルゴンの崩壊，すなわちアルゴン 37 が存在していた証拠となる．

ポンテコルボのアイデアは，中性子がニュートリノを捕獲して陽子になり，同時に電子を放出する逆ベータ崩壊反応を探すことであった．もし，マヨナラの仮説が正しければ，この反応は反ニュートリノでも起こるはずである．ポンテコルボは，自然界に存在する塩素の 25%近くを占める質量数 37 の塩素の同位体（陽子 17 個と中性子 20 個で構成されている）が，このタイプの反応を調べるのに好都合な原子核であることに気づいた．

ニュートリノを吸収すると塩素中の中性子は陽子に変わり，塩素原子核は化学的に塩素とまったく異なる性質を持つ質量数 37 のアルゴンになる．アルゴンは不活性ガスなので周囲の四塩化炭素分子から遊離し，四塩化炭素分子の液体から取りのぞくことができるとポンテコルボは考えた．しかも，形成

されたアルゴンは質量数37であり放射性の物質である．このアルゴンは35日の半減期寿命を経た後に，原子軌道を回る電子を捕獲して塩素37に逆戻りする．このような捕獲反応が起こったことを示す証拠は，原子がもっとも内側の軌道を回っている電子の一つを失い，電子配置の再調整を行う際に伴なう低エネルギー電子の放出である．

[注：ここで起こっていることは，電子捕獲反応で新しくできた電子軌道の空孔を埋めようと他の電子がそこに移動する時に，この電子が放出するエネルギーをもらって，さらに他の電子が原子から蹴り出される現象である．1922年にリーゼ・マイトナーは，ベータ線のエネルギー分布の中で見つかった線スペクトラムを，ベータ崩壊後に原子が電子再配合の際に生じた低エネルギー電子のせいであると示唆した．しかしながら，この効果は1925年に再度，同じ現象を発見したフランスの物理学者ピエール・ビクター・オージェの名にちなんで，オージェ効果と名づけられた．

デービスの最初の大型塩素検出器に3800リットルの四塩化炭素（CCl_4）が満たされ，ニューヨーク州ロングアイランドにあるブルックヘーブン国立研究所の研究用原子炉から発生する反ニュートリノの照射を受けた．宇宙線によるバックグランド現象を理解するテストの一貫として，彼は宇宙線中の素粒子の影響を極力減らすために，検出器を研究所内の地下5.7mに埋設した．反応によって発生したアルゴン37の量は，あらかじめ予測した測定量よりも少なかった．この結果からデービスは，太陽から毎秒やってくるニュートリノの“検出可能”な数は，$1\,cm^2$当たり10^{14}個以下であると計算した．

ここで鍵となるのは，“検出可能”という言葉である．最初の太陽内の核融合反応過程である陽子―陽子反応から発生するニュートリノは，最大エネルギーが僅か0.42 MeVでしかない．しかし，塩素37のニュートリノ捕獲反応は，ニュートリノが0.86 MeVよりも大きなエネルギーを持つ場合にのみ起こる．1955年当時，デービスはもし太陽が炭素や窒素，酸素を含む反応連鎖によって水素をヘリウムに転換するなら，この場合に生成されるより高いエネルギーのニュートリノを測定することが唯一のチャンスであると考えていた．しかし，天文学者はすでに，太陽の内部はこのような反応連鎖が起こるほど温度が高くなく，水素の燃焼は陽子―陽子反応連鎖を通して起こるものと信じていた．もし，本当にそうであれば，太陽ニュートリノを検出することは絶望的である．

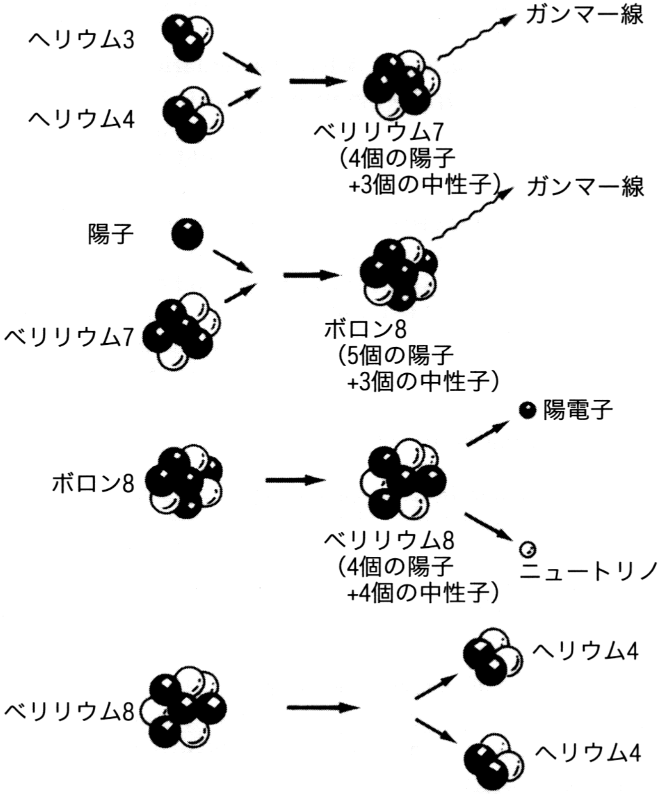
その後の数年間に，ニュートリノは何度も検出された．それによりデービスは太陽ニュートリノ検出器に対する期待を強めたり，又はくじかれたりしたが，ついに南ダコタ州ホームステーク金鉱での実験の成功で，期待はこの上なく高まった．成功の最大の鍵は，4個の陽子からヘリウムが作られる過程でごく稀に起こる変則的と考えられていた反応過程の頻度が，実はずっと多かったことであった．

ヘリウムに至る反応連鎖の第二段階では，第一段階で作られた重陽子（陽子と中性子で構成）が，他の陽子と結合してヘリウム3（通常ヘリウムと呼ばれている質量数4のヘリウム4より，中性子が1個少ない，軽いヘリウム原子核）を生成する．次ぎの段階では，2個のヘリウム3が結合して，2個の余分な陽子を放出しながらヘリウム4を作る．この過程で陽子は，反応によって解放されるエネルギーのほとんどを持ち出す．しかしながら，もう一つ別の反応の可能性がある．ヘリウム3原子核が，すでに作られているヘリウム4原子核と結合して，ベリリウム7を作る過程がそれである．

1958年にワシントンにある海軍軍事研究所の2人の物理学者は，ベリリウム7を作る過程が過去に予想していたより，1000倍も頻繁に起こることを発見した．今日では，この過程が水素からヘリウムへの転換の15%を占めることがわかっている．カリフォルニア工科大学ケロッグ放射線研究所で，天体核物理学者達を指導していたウィリー・ファウラーは，すぐさま太陽ニュートリノを検出するための新しい反応連鎖網を作り上げた．

太陽内で生成されるベリリウム7はどれも電子を吸収してリチウム7になる．そして，リチウム7は他の陽子を捕獲して2個のヘリウムを作る．これが，水素からヘリウムへの転換過程の最終段階である．しかし，このほかに，ベリリウム7が陽子を捕獲してその結果ボロン8を作る可能性もある．このボロン8は不安定で，すぐに陽電子とニュートリノを放出して崩壊し，ベリリウム8となる．ここで重要なことはファウラーが指摘したように，このニュートリノはエネルギーが15MeV近くまで分布し，塩素37によるニュートリノ捕獲反応に必要なエネルギー量を充分に満たしていることである．

ファウラーとオンタリオ州チョーク・リバー研究所のアラスター・カメロンは，直ちにこの可能性をデービスに知らせた．今度は，デービスが計算を行なった．彼は，当時ジョージア州サバンナ・リバー原子炉に設置してあっ



ボロン8の生成と崩壊

4個の陽子からヘリウム4を作るもう一つの方法は，さらに数段階の反応が進行して，より複雑な原子核が関与するものである．太陽内で生成されるヘリウムの0.1%は，基本過程の陽子＋陽子反応で作られるヘリウム3とヘリウム4（199ページに図示）が，さらに反応してボロン8原子核を生成する過程を経由する．このボロン8原子核は不安定で，すぐに陽電子とニュートリノを放出してベリリウム8に崩壊する．このニュートリノのエネルギーは，陽子＋陽子反応に伴って出てくるニュートリノのエネルギー（0〜0.42MeVまで）に比べてずっと大きく，14MeVまで可能である．

た四塩化炭素の入った1900リットル・タンク2基で，1日7個以上の太陽ニュートリノを捕獲できるはずであると割り出した．

しかし，この発見がもたらした興奮は長くは続かなった．1960年までにケ

ロッグ研究所のラルフ・ケーブナは，実験室においてベリリウム7が陽子を吸収する確率を測定した．そして，その測定結果は期待に反して小さかった．ファウラーは，太陽内のヘリウム転換過程のうち，この反応過程を経由するのは，僅か0.02%であろうと推定した．そうであれば，地球に到達する高エネルギー太陽ニュートリノの数は，毎秒，1平方 cm^2 当たり約1千万個ということになる．この数字は余りにも小さすぎて，このまま実験を続けることはできそうにない．フレッド・ライネスは1960年代の状況を回顧して，次ぎのように書いている．

毎秒，1平方 cm^2 当たり 10^7 個のフラックスでは余りにも少なすぎる．これでは，1日10個のニュートリノを検出するには，1000 m^3 以上の有効体積を持つ検出器が必要になる．そんなに大きい検出器は非現実的であると考えられていた．千ガロン，いや，ひょっとすると10万ガロンの四塩化炭素を用意しても，測定できずに終わる確率が高い．これでは，研究者も実験に二の足を踏みかねない[5]

しかし，デービスはたとえ太陽ニュートリノを検出できる見込みが立たなくとも，簡単に引き下がる人ではなかった.[6] 彼は，サバンナ・リバーで行なった3800リットルでの実験を，1000倍に拡張することは不可能ではないと信じていた．そして1963年に実験計画は再び動き出した．今度は，太陽内における反応ではなく，ニュートリノと塩素37との反応に関する吉報が舞い込んだことによる．

1962年までに，デービスはインディアナ大学の天体物理学者ジョン・バコールと共同研究を始めた．それは今日まで続いている[注2]．1962年の夏，バコールはケロッグ研究所のファウラーのグループに加わり，地球上にやってくるニュートリノのフラックスを計算することを視野に入れて，太陽の精密な理論モデルを作る研究に取組んだ．1年後に彼は，もう一つの研究結果を出した．それは，実際に検出の期待がもてる太陽ニュートリノ検出器を設計する

注2 太陽標準理論の構築，太陽ニュートリノ実験の提案，太陽ニュートリノ欠損現象の解明やハッブル望遠鏡の開発・推進に多大な貢献を残したジョン・バコールは，2005年8月17日に血液疾患のため70歳でこの世を去った．誰とでも気さくに話をし，多くの研究者がバコールとの議論をとおして鼓舞された．訳者もその一人で，2004年にストックホルムで開催されたノーベルシンポジウムで，原子炉反ニュートリノ振動データ解析の議論をしようと約束しそれを楽しみにしていたが，会議直前に突然体調を崩したとの知らせを受けたのが最後であった．

一助となった．塩素 37 原子核がこれまで考えられていたよりも 20 倍も高い確率で，ボロン 8 原子核の崩壊から生成されるニュートリノを捕獲することを発見したのである．塩素 37 は通常，ニュートリノを捕獲するとアルゴン 37 の基底状態へ遷移するが，それだけではなく，励起状態へも遷移することが可能であった．このことは，デービスの望みをとてつもなく大きなものにした．

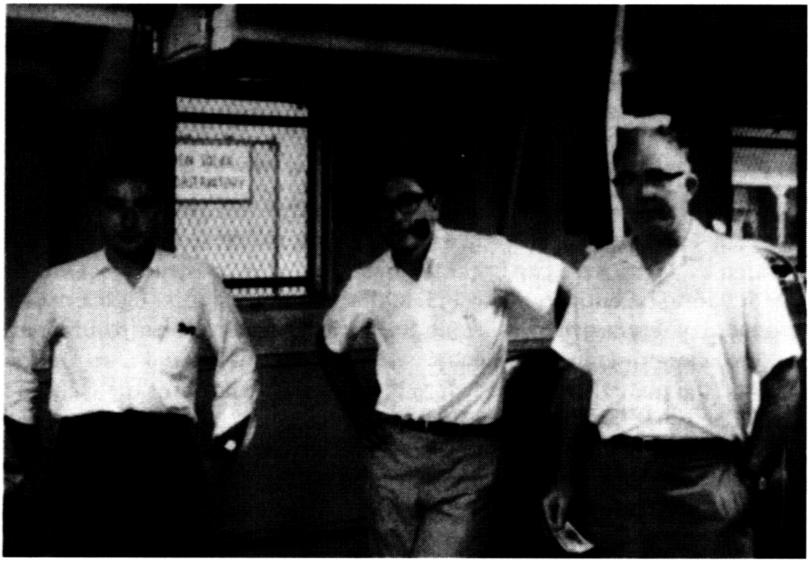
ニュートリノ捕獲反応によるアルゴン 37 のアイソバリック・アナログ状態への遷移が，全捕獲率を大幅に増加させる．この事実によって，デービスの 10 万ガロン（38 万リットル）実験構想は大幅に前進した．彼にとってアナログ状態は，原子核物理学者を魅了する意味で美しく，新しい概念であったのみならず，期待される全捕獲率を 1 日当たり 4〜9 個にふやした．いよいよ実験は現実味を帯びてきた．塩素実験は太陽の中心温度を測定する方法と考えることができ，デービスはこの点を天体物理学者に強調すべきであると思っていた.[7]

ボロン 8 原子核を生成する反応率と，ひいてはこの原子核から放出される高エネルギーのニュートリノの数は，太陽内部の温度によって大きく変化する．バコールはニュートリノの数を 50%の精度で測定することによって，太陽中心部の温度を 10%以内で決定できると主張した．

1964 年 3 月にバコールとデービスは，提案した 38 万リットル実験の理論的および実験的考察についての論文をフィジカル・レビュー・レター誌に発表した．しかし，ファウラーはこの提案された実験に興味を示さなかった．12 月にホームステーク社は，南ダコダ州リードにある同社の金鉱の地下ほぼ 1500m に，要求に見合う実験用空洞を掘削する費用について，好意的な見積書を提出した．この年に一番盛り上がったのは，バコールが改良を加えた塩素 37 原子核の捕獲率の計算と，同じ計算方法で求めたカルシウム 37 原子核の半減期が，ほぼ実験値と一致していることが確認されたときである．バコールは後に，この知らせを受けたときのことを,「自分の研究歴の中で最も興奮し，かつ満足感に充たされた瞬間であった」と回想している.[8]

ホームステーク金鉱の地下へ

デービスは私に，実験は単純で“単なる配管工事”であり，化学処理は“標準的”なも



デービス（右）とバコール（中央）．この写真は 1964 年に，塩素 37 を用いた太陽ニュートリノ検出が有効であることを考案した直後のもの．一緒に並んでいるのはドン・ハーマーで，彼もまた実験で重要な役割を果たした．背後に見えるのは，実際に使用するものを小型にした塩素容器である．（デービスとバコールの好意による）

のだ，と言っている．私は彼を信じなければならないだろう．しかし，化学者ではない私は，彼の任務の重大さと，彼がこの実験を遂行する上で必要となる正確さの重要性を考えると，畏敬の念に打たれる．[9]

ジョン・バコール，1969

1965 年 5 月，ホームステーク鉱山会社は，38 万リットルの 2 塩化炭素のタンクを収納する，$9 \times 18 \times 9.6\ \mathrm{m}^3$ の空洞の掘削にとりかかった．約 2ヶ月後に完了し，デービスと彼の共同研究者であり実験に最適の鉱山探しに大いに活躍したブレアー・ムンホーヘンは初めて空洞を視察した．

空洞に連れて行ってもらうと，彼らはさっそく鉱山用の懐中電灯であたりを照らし始めた．突然，明かりがつけられ，メッシュ状のフェンスで覆われた壁と，タンクを支持するための台座が取りつけてあるコンクリート床，32 フィート頭上にある，物資持ち上用のホイストを吊るすモノレールなどを備えた巨大な空間が目に飛び込んできた．[10]

タンクを組み立てたのは，シカゴの鉄橋梁会社であった．この会社は明らかに,「実験計画の目的と異例の設置場所」[11] とに興味を持っていた．建設にあたって，重要な点が2つあった．1つは，タンクに使用される鉄板が，その表面から自然放射能によるアルファー粒子をあまり放出しないものでなければならないことである．この種のアルファー粒子は，検出器の中でアルゴン37を生成することができる．そこで，デービスとムンホーフェン，ドン・ナーマーは，製造のゴー・サインを出す前にみずから鉄板を調べた．もう一つ重要な点は，大気中のアルゴンがタンク内に侵入するのを防ぐために，タンクの気密が完璧でなければならないことである．この点に関しては，この会社は宇宙開発機構（NASA）での大型気密容器の建設に携わっており，充分な専門的知識を持っていた．

タンクは1966年の夏までに完成した．続いて，カンサス州ウィチタにあるフロンティアー・ケミカル社から，2500リットル積載のタンク・ローリで運ばれてきた2塩化炭素の充填作業が始まった．鉄板と同じく，積荷はウィチタを出る前にサンプルを抜き取ってアルファー粒子を計測する検査が行われた．タンクへの充填は，5週間を要した．最後に2塩化炭素を化学処理する装置が設置されるとデービスの実験チームは，38万リットルの液体から液内に溶け込んでいる大気中のアルゴンの量を最小限に抑えるために，空気などの気体を除去する時間のかかる作業にとりかかった．そして，ついに検出器は太陽ニュートリノを待ち構える準備態勢を整えた．

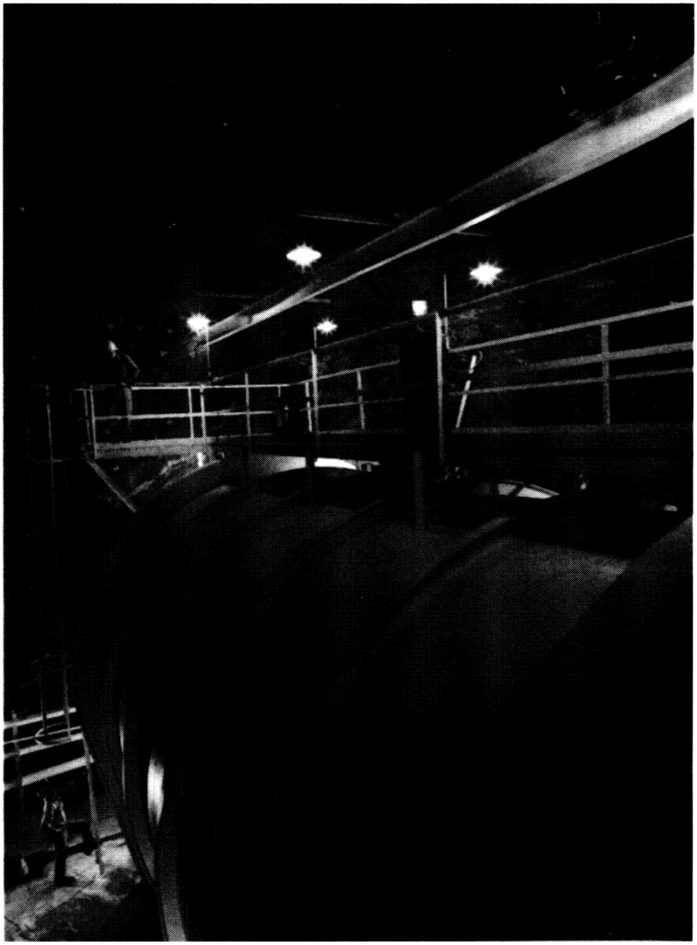
こうして，途中数回の中断はあったものの，20年以上におよぶ実験が開始された．実験方法はまず，1〜3ヶ月にわたってタンク内に太陽ニュートリノによって生成されるアルゴン37を蓄積させることから始まる．その後，できるだけ多くのアルゴンを液体中から取り出すために，毎分1万リットルのヘリウムガスでタンク内をハブリング脱泡する．アルゴンの回収効率は95%である．タンクに注入されたヘリウムガスの流れは，その後液体窒素によって絶対温度77Kに冷された活性炭吸着容器に入る．これくらい温度が低いとアルゴンは，ヘリウムから離れ吸着器の中で濃縮される．一方，ヘリウムガスはさらに低い温度で濃縮され，再びタンクに戻される．

脱泡工程が終わるやいなや活性炭吸着器は，アルゴンガスを分離するために熱せられる．そして，遊離したアルゴンガスは集められ，さらに，実験の邪

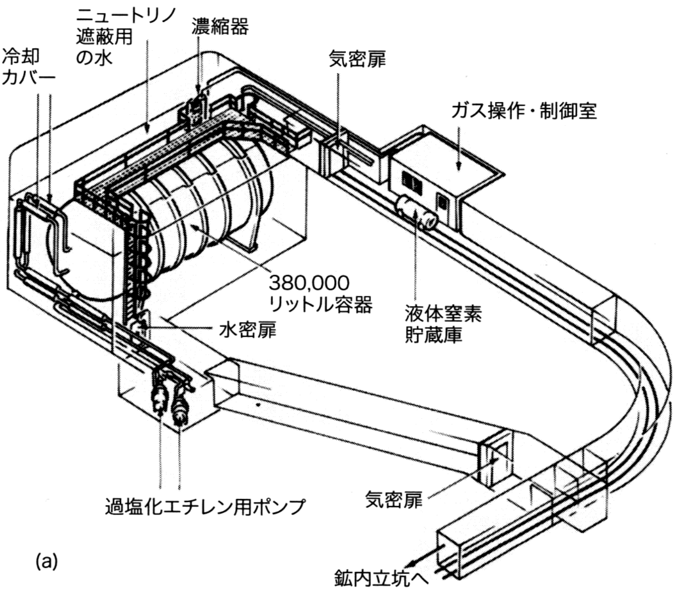
魔になる放射性物質の痕跡を除くために化学的に純化処理される．約 1 cm^3 のガスの最終サンプルは，主にアルゴン 36 を含んでいる．このアルゴン 36 は安定なアルゴンであって，実験チームがデータ収集の各期間の最初に，回収を目的として混ぜたものである．どのくらいの量のアルゴン 36 が回収されたかを測定することによって，研究者はそれぞれの期間での実験装置の回収効率をチェックすることができる．このほかに僅かな量ではあるが，大気中に存在する通常アルゴンと呼ばれているアルゴン 40 が混入していることもある．最後に残ったサンプルの中には，太陽の心臓部でボロン 8 の崩壊によって作られたニュートリノと塩素 37 との相互作用による産物である，アルゴン 37 の原子が数十個含まれているはずである．

次の段階では，純化処理されたアルゴンのサンプルの中にあるアルゴン 37 の個数を計測する．この計測のために実験チームは，小型の比例計数管の中に，サンプル全体をセットしなければならない．この比例計数管は直径 0.4 cm，長さ約 2.5 cm の小さな金属管で，円筒の中心線に沿ってワイヤーが張ってある．ワイヤーと管の間にかけられた高電圧は，比例計数管の中に封じ込められたガス内に電場をつくる．ガスの中を走るどんな荷電粒子もガスを電離し，陽極となるワイヤー方向に電場内を移動する自由電子を生み出す．これらの電子はさらにガスを電離し，雪崩現象を起こす．その結果，多数の電子がワイヤーにたどり着く．ワイヤーに集まった全電子数，つまり発生した電子パルスの大きさは，ガス内を通った荷電粒子のエネルギーに比例する．これが，比例計数管の名前の由来である．

アルゴン 37 は崩壊するとき，低エネルギー・オージェ電子をたたき出す．この電子は比例計数管のガス内を，僅か 0.1 mm ほど走る．このため，すべての電離電子は互いに近接して生成され，ワイヤーに到達する時間間隔は狭い．その結果，検出される信号パルスの波形は，立ち上がりも立下りも鋭くなる．この特徴的なパルス形状のおかげで，アルゴン 37 の崩壊に伴うパルスと他の放射性源によるパルスとが識別される．典型的なサンプル 1 つにつき，実験チームはこの形状のパルスを約 6 個計測する．つまり，彼らは 10^{30} のオーダの原子を蓄えているタンクの中から，数個のアルゴン 37 原子を取り出して 1 個，1 個測定することを可能にした．この技術は比べようもない驚くべき業である．

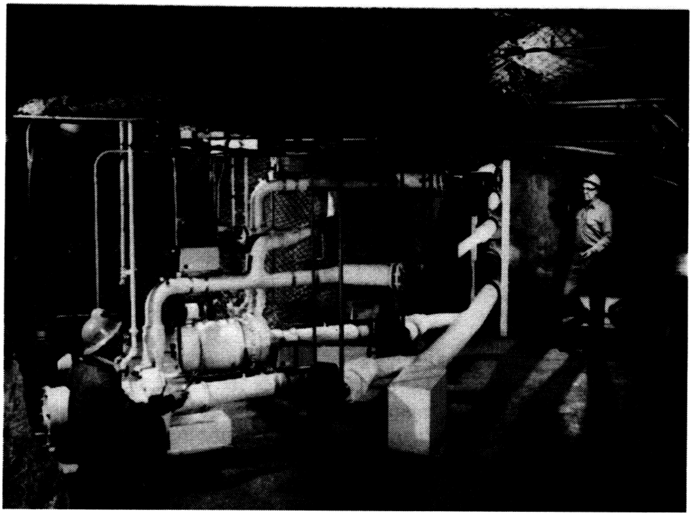


デービスと共同研究者が，南ダコタ州リードにあるホームステーク金鉱の地下 1500m に建設した塩素 37 太陽ニュートリノ検出器．検出器の心臓部は，直径 6.1m× 長さ 14.5m のタンクで，38 万リットルの 2 塩化炭素を蓄える．この写真の中で，タンクの上の補助通路に立っているのがデービス，下にいるのは，技術者のジョン・ガルビン．タンクの周囲の空洞は実験中に岩盤から出てくる中性子を遮蔽するため，水で満たされる．（ブルックヘーブン国立研究所提供）

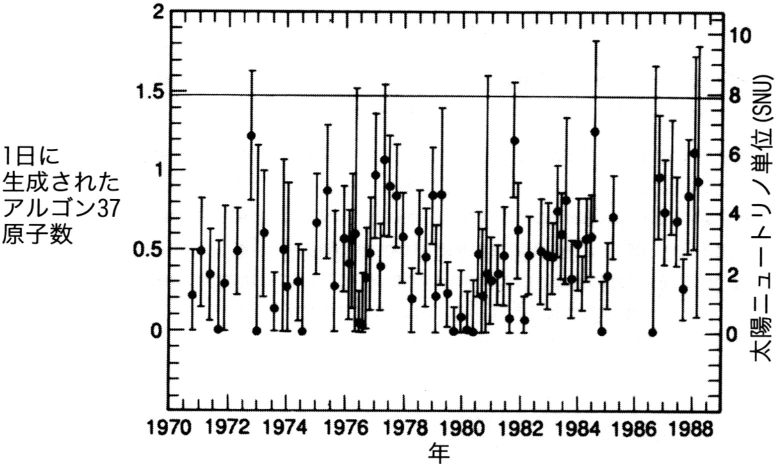


(a)

(b)



(a) ニュートリノ反応で作られるすべてのアルゴンを取り出すため，タンク内の2塩化炭素は数週間おきに，ヘリウム・ガスによって脱泡洗浄される．そして，ヘリウムはタンクの上部から流れ出て，ガス操作室に導かれる．そこで，アルゴンはフィルターによって分離・純化される．アルゴン37を抽出するためのヘリウム・ガス循環システムは，この検出器の生命線である．(b) ゲアハルト・フリードランダーがポンプを調べている．デービスがドアを開けて入ってきた．



デービス・チームがほぼ20年におよぶ実験によって得た結果は，検出器の中でアルゴン37が，常に2日に1個の割合で生成されることを示している．一方，標準太陽理論によると，アルゴン37が生成される割合は，実験値の3倍である（図中の水平線）．

実験は20年以上もの間，ほとんど間断なく今日まで稼動している．1985年5月に，液体を循環させる2台のポンプが故障したため，運転は約1年間停止した．1986年に，新しいポンプが1台取りつけられ，その年の10月には実験を再開した．そして，1988年4月に，2台目の新しいポンプが加わった．

実験結果は，素粒子物理学者と天体物理学者に，20世紀後半の最大の謎の一つを提供した．1968年に最初の結果がフィジカル・レビュー・レター誌に掲載されたときから一貫して，デービスが測定した太陽ニュートリノの数は，バコールと彼の共同研究者が太陽内部の詳細な理論から予測した数よりも少なかった．1977年から1988年までに約80回のデータ収集が行われたが，その間に，検出器は平均して2〜3日に1個のニュートリノを捕獲した．これは，理論的予測から期待される捕獲数の僅か1/4である．

バコールとデービスは1982年に，次のように述べている．

最初の論文を発表して以来，十数年にわたって実験装置の性能の確認や理論の詳細な改良に絶えず努力を払ってきた．にもかかわらず，観測結果にも太陽標準理論にも，ほとんど定量的な変更はなかった．これは，われわれにとって失望を通り越し，むし

ろ驚きであった.[12]

何が悪いのだろうか．実験か？ 太陽理論か？ それとも，ニュートリノについての理解だろうか．デービスと彼の仲間は自分たちの実験装置を理解するために常識を越えた入念な点検をおこない，それによって，世界中の実験研究者の懐疑的な追及を退けることができた．これで，実験結果に疑念を持つ人はほとんどいなくなった．かわりに，実験結果は，多くの物理学者に抗しがたい挑戦の場を用意し，巧妙な新しい理論や工夫を凝らした新しい実験の提案を促すことになった．

2番目の太陽ニュートリノ実験

ちょうど数ヶ月前，渡来方向を検出できる実験から，太陽がニュートリノを放出しているまぎれもない証拠が得られた．この結果は，太陽エネルギーがたしかに核融合反応によってつくられている最初の実験的検証となった.[13]

リンカーン・ウォルフェンシュタイン，ユージン・バイヤー，1989

1970年から1988年の間にホームステーク鉱山で行われた塩素37実験によって，塩素原子1個当たりのニュートリノ捕獲率は毎秒（2.2±0.3）$\times 10^{-36}$であることが判明した．ここで，0.3×10^{-36}は測定におけるいろいろな不確定性を示す．捕獲率が非常に小さいため，ここで使われる単位は紛らわしい．そこで，1969年にバコールは，もっと便利な塩素37原子1個当たり毎秒10^{-36}個の捕獲率を1とする，“太陽ニュートリノ単位”を提案した．単位名は通常，SNU（Solar Neutrino Unit）の短縮形で表され，“スヌー”と発音されている．

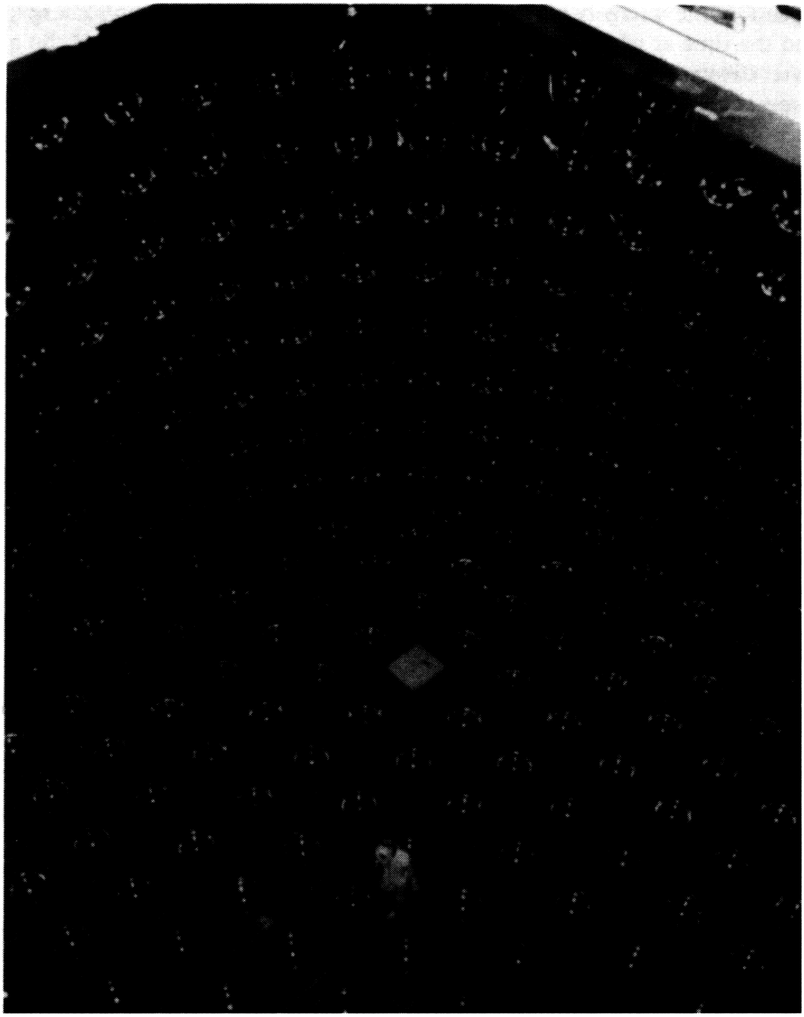
実験結果を太陽標準理論に基づく予測と比較するときに問題がもち上がった．太陽標準理論とは，安定に進化し続ける太陽の燃焼源が水素の核融合反応とする理論である．この理論から予測すると，塩素実験における捕獲率は（7.9±2.6）SNUとなる．よって，理論と実験，双方の誤差を両極端にとったとしても，実験値と理論値は一致しない．

実験に問題があるのだろうか．20数年におよぶ入念な調査からすれば，答は間違いなく“ノー”だ．しかしながら，科学者はしばしば一つの実験結果

を，他の独自の実験によって検証が行われるまで，疑い続ける．この 20 年間，ホームステーク金鉱における実験が唯一であった．必要な時間と予算を投入しようとする者は，他に誰もいなかった．しかし，ついに 1989 年，デービスの結果を支持する実験が出てきた．それは，まったく異なる手法の実験で，太陽からやってきたニュートリノを測定していることを確認する能力を備えていた．

それは，神岡鉱山で行われている実験である．神岡鉱山は，東京から約 300 km 西の日本アルプスの山中に位置し，ダコタ州からは地球を半周した所にある．この実験装置は，東京大学を中心とする幾つかの日本の大学とつくば市にある高エネルギー物理学研究所（KEK：現高エネルギー加速器研究機構）の共同チームによって建設された．当初の目的は，核子崩壊現象を探索することであった．そのため，神岡（KAMIOKA）核子（Nucleon）崩壊（Decay）実験（Experiment）にちなんで，KAMIOKANDE（カミオカンデ）と名づけられた．その後，1984 年に日本チームは太陽ニュートリノが検出できるように検出器を改造して性能向上を図ることになり，ペンシルバニア大学のグループを実験に加わるよう勧誘した．そして，カミオカンデ－II 実験が誕生した．

カミオカンデは，太陽ニュートリノを測定するために安価で簡便な物質：水を使用している．原子内部のビリヤード・ゲームでは，衝突がめったに起きないために見物人はたいてい途方もない忍耐力を要求される．だが，太陽ニュートリノはときどき，水中の電子と衝突して進行方向とほぼ同じ方向の前方へ電子を蹴り出す．電子は水中を走るとき，進行方向に沿って円錐状に光を放出しながら電磁気的痕跡を残す．検出器の内壁の全面に配置してある光電子増倍管はこの光に高い感度を持ち，円錐光をキャッチして電子の走行を検知する．円錐光の軸は電子の運動方向を示し，光の強度は電子のエネルギー量を知る目安となる．そして，光信号が検出された時間も記録される．このように水検出器は多くの測定機能を持っており，ニュートリノ反応か否かを識別することができる．しかしながら，塩素実験と同じくカミオカンデ－II は，太陽ニュートリノの中でもエネルギーの高いニュートリノのみ測定する．なぜなら，有効な信号を発するのは，比較的高いエネルギー（最初の実験結果では 9.3 MeV 以上）の電子に限定される．



日本アルプスにある神岡鉱山の地下 1000m に設置されているカミオカンデ II 検出器．主要部分の内部検出器は，直径 15.6m× 高さ 16m の水タンクである．このタンクの内壁には，直径 50cm の口径を持つ光センサーの光電子増倍管が格子状に取付けられている．写真はタンク上端部から見下ろしたもので，底部に人が見える．(小柴：Kamiokande II 提供)

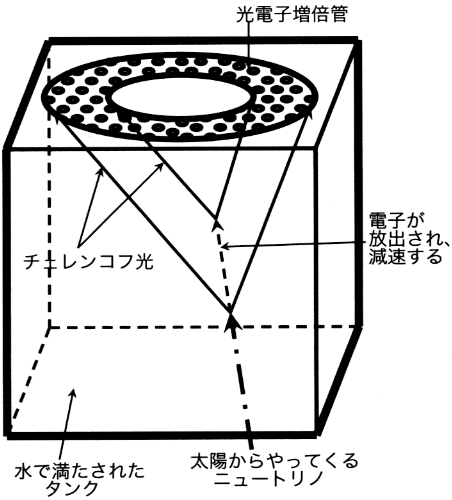
水検出器の原理的な難点は，1 個の電子を生み出す現象が検出器内部や周囲の物質中に含まれている放射性物質からのベータ崩壊，ガンマー線や中性子の相互作用などのいろいろな反応過程からも引き起こされるところにある．しかし，1 年に渡るこのような数々のバックグランド源の除去との戦いの後，カミオカンデー II は 1986 年の初めまでに太陽ニュートリノ信号を本格的に検出する準備が整った．予測される太陽ニュートリノ反応の検出頻度は，2〜3 日に 1 回であった．ところが，光電子増倍管は，数秒毎に光を感知して信号を出す．そのうちの半分は，このような地下奥深くまでも侵入してくる，宇宙線ミューオンが作る光信号である．しかしながら，研究者達は光電子増倍管の受光分布のパターンを解析することによって，太陽ニュートリノ以外のものに起因する現象をほとんど除外することができた．

1989 年 7 月，実験チームは論文を発表した．この論文には長い間待ち望まれた 2 つの結果が記述されていた．1 つは，実験チームが測定した電子の運動方向の分布の中で，より多くの電子が太陽からの方向と一致し，太陽を起源とするニュートリノ信号を検出したことである．2 つ目は，カミオカンデー II でもやはり検出した高エネルギー・太陽ニュートリノの量が，太陽標準理論が示唆するよりも少ないことが明らかになったことである．

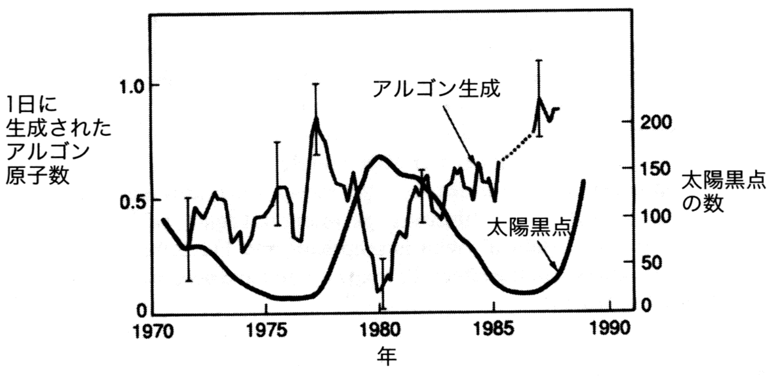
1990 年 4 月までにカミオカンデ・チームは，1000 日以上にわたって収集したデータから結果を引き出した．それを見ると，検出したニュートリノ反応の数は，太陽標準理論によってボロン 8 の崩壊から予測される数の 0.46 倍であった．さらに，実験チームは，散乱電子のエネルギー分布がボロン 8 の崩壊によるニュートリノから予想される分布と，よく一致することを初めて検出した．1990 年 9 月のフィジカル・レビュー・レター誌に発表された論文の中で彼らは次のように結論した．

> … ボロン 8 を副産物として生成する太陽内部の核融合反応によるエネルギー生成機構は，太陽中心部にのみ発生源を持つニュートリノが検出されたことによって，紛れもなく実証されたと言えるであろう．[14]

カミオカンデー II で観測された実験値と理論予測値との比を，塩素実験と同じ方法で比較することはそう単純なことではない．塩素実験は，0.86 MeV 以上のエネルギーを持つニュートリノをすべて捕獲することができる．その



太陽からやってくるニュートリノは，水の中の電子と反応する．その結果，電子はニュートリノの走行方向とほぼ同じ方向にはじきだされる．水中を走る電子は，円錐面を沿う光を発する．これをチェレンコフ放射という．この光が検出器の壁に到達すると，図示されているようにリング内の光電子増倍管によって検知される．



ホームステーク鉱山における塩素実験の結果は，太陽ニュートリノ検出数が，太陽表面に現れる黒点の数の増加につれて減少しているかに見える．

ため，塩素実験で測定されるニュートリノのうち，ボロン8が関与する分が何割かについて，なんらかの仮定を設けなければならない．しかしながら，

カミオカンデ－II は，塩素実験よりも多くのニュートリノ反応を検出しているようだ．バコールとベーテは，カミオカンデのニュートリノ検出数を塩素実験に焼き直すと，4 SNU に相当することを示した．これは，ホームステーク鉱山で測定された数値，(2.1±0.3) SNU とは明らかに一致しない．この食い違いは本章の後半で紹介するが，太陽ではなくニュートリノ自身について，新しい興奮を巻き起こすような理論を構築する指針となる．

そうこうする間にもカミオカンデ実験は，今後，少なくとも数年は，有益な比較・検討を可能にするデータを提供してくれることであろう．そして，その結果は，最近になって顕著になってきた太陽ニュートリノ問題の新しい側面に，なんらかの解決の糸口を与えるだろう．新しい側面とは，1985 年の後半からホームステーク鉱山の実験が，以前よりも多くの太陽ニュートリノを検出する傾向を示していることである．その捕獲率は（3.6±0.7）SNU に達した．この明らかに見える変化は，太陽に原因があるのだろうか．塩素実験の 1 年ごとの測定値を図示したデータを見ると，測定値が変動していて，太陽黒点の数となんらかの相関があるように思える．私たちが目にすることのできる太陽表面に存在する，これらの黒く冷たい領域の個数は，太陽活動サイクルとされている 11 年の周期で規則正しく変動する．ホームステーク鉱山の実験結果を見ると，太陽表面の黒点数が少ない期間に，より多くのニュートリノが検出されているように見える．そして，1986 年は，太陽黒点サイクルは最小であった．しかしながら，カミオカンデ－II 実験の 1000 日分のデータは，太陽黒点サイクルが最小から最大へ急激に変化した時期に取得されているが，まったく変動を示していない．

太陽黒点と太陽ニュートリノの間にはっきりとした相関があるとは，誰もが確信しているわけではない．もし，カミオカンデ－II 実験が，太陽黒点数の最大となる 1991 年ころまでデータを取り続けるなら，時間が答えを出してくれるだろう．塩素実験の捕獲率は，太陽黒点数が増加するにつれて再び減少するのだろうか．この件について，バコール（彼は懐疑的である）とデービスはシャンパンを 1 本賭けた．みなさんが本書を手にするころには，この

勝負はついているかもしれない[注3].

太陽の問題

塩素実験で見つかった太陽ニュートリノ捕獲率の観測値と計算値との驚くべき食い違いは，長い間謎として残り，多くの想像力に富んだ科学的解釈や幾つかの科学小説を生み出した.[15]

ジョン・バコール，1987

太陽に問題があるのか．いや，もっと正確に言えば，太陽に対する私たちの理解に問題があるのか．1986年以来，ニュージャージ州のプリンストン高等物理学研究所に籍を置いているバコールと，カリフォルニア大学ロスアンジェルス校のロジャー・ウルリッチは，太陽標準理論のモデル作りに精を出した．計算にあたって彼らはまず，一つの基本となる仮説を立てた．それは，太陽は核融合反応で生じたエネルギーによる外向きの力と，重力による内向きの力がちょうど均衡を保つ，静力学的平衡状態にあるとする．彼らの手法は，太陽の進化を記述する数種類の方程式を書き下し，生まれたときから45億歳の現在まで，太陽のあらゆる年代に対する方程式を解く．

この計算の目的は，初期条件と太陽の進化を支配している幾つかのパラメータを変化させてみて，太陽が現在の大きさ，年齢，表面光度となるのは，どのような初期条件，どのようなパラメータの組み合わせを取ったときなのかを探り出すことである．このようにして得られた初期条件とパラメータの組み合わせから，太陽モデルが作られる．バコールとウルリッチはとりわけ，初期太陽における水素，ヘリウムと他の元素の存在比を，彼らのいろいろなモデルの中で変化させた．その結果，現在の年齢の太陽が今あるとおりの特性を備えるのは，初期の存在比が宇宙空間で一般に観測されている存在比と同じ場合であることがわかった．それはまた，彼らの手法は有効であり，現実を反映した太陽モデルを提供するともいえる．それではどうして，このモデルから予測される塩素実験の太陽ニュートリノ捕獲率が，非常に大きいのだ

注3　その後のカミオカンデの測定から太陽ニュートリノと太陽黒点数の有為の相関は得られなかった.

ろうか.

塩素実験が抱えるおもな問題点の一つは，太陽から放出されるニュートリノのほんの一部にすぎない，主としてボロン8の崩壊によって生成される，もっとも高いエネルギーを持つニュートリノのみを検出している点である．それゆえ，観測した捕獲率と予測値との食い違いを解消するための試みは，ほとんどがボロン8の崩壊数を少なくし，それによって高エネルギー・太陽ニュートリノの数を減らす手法の考察に的が絞られた.

太陽燃焼炉では，ベリリウム7原子核がまわりにいる陽子を捕獲して，ボロン8を生成する．しかし，この反応過程は，燃焼炉の温度に大きく左右される．陽子と4個の正電荷を持つベリリウム7との間には，強い静電反発力が働く．太陽内部の温度は，熱エネルギーが陽子を手助けして，この反発力を打ち負かすことができるほど高くはない．そのため，捕獲過程が進行するのは唯一，量子力学的“トンネル現象”を経由する場合のみである.

量子論によれば，陽子のエネルギーはその平均熱エネルギー値を中心に揺らいでいる．そのため確率は非常に小さいとはいえ，たまには陽子がトンネル効果を起こせるだけのエネルギーを持って，ベリリウム7原子核のまわりの斥力障壁を横切ることもないとはいえない．このわずかのチャンスが生まれるかどうかは，温度に大きく左右される．太陽内部の温度がほんのわずかでも下がれば，ボロン8の生成率は大幅に減少するにちがいなく，ひいては，ホームステーク鉱山で捕獲される太陽ニュートリノの数も減ることになる.

このように太陽モデルを調節する試みは，しばしば内部温度を下げることに集中した．たとえば，熱は中心部から，これまで考えられていたよりも，速いスピードで流出できるのか．もし，太陽内部の重元素の量が表面よりも少ないとすれば，それはあり得る．重元素は光子との散乱によって，光子のエネルギーを吸収する．だから，もし，太陽の中心近くで重元素の存在比が小さければ，より多くのエネルギーが外層部に流れ出る．その結果，中心部は冷たくなるはずだ.

太陽中心部の温度を下げる方法に関して，もう一つ別の考えがある．それは，WIMP（Weakly Interacting Massive Particle）の存在と関連している．天体物理学者は，宇宙暗黒物質の謎を解明するために，このような粒子の存在を指摘した．銀河内の星の運動を観測した結果，銀河の質量の約90%は電

波や光を放出せず，そのため光り輝いて見えないのだと考えてもよさそうである．この大量の質量の源泉については，後で紹介するように，質量を持ったニュートリノとするハロー説をはじめ，多くの推論が出された．物質と非常に弱く相互作用をする質量を持った新しい粒子の存在は，一つの可能性にすぎない．

たとえば質量が（2 − 10）GeVであるようなおあつらえ向きの特性を持つWIMPは，二重の魅力がある．すなわち，銀河の見えない質量を提供するだけではなく，太陽の中心部からエネルギーを運ぶ担い手となり，それによって中心部の温度を下げ，太陽ニュートリノ問題をも解決してくれる．しかし，ニュートリノの種類が3つしかないとしたLEP実験（CERNの電子・陽電子衝突実験）の結果（第4章参照）は，WIMPの特性を厳しく制限する．LEPの結果によって，太陽ニュートリノ問題を解決するために，これまで提案された幾種類ものWIMPの可能性は排除された．

そのほか，数多くの非標準太陽モデルも提案された．しかし，どれもこれも難点がある．太陽ニュートリノ問題を解いてくれそうなのだが，その一方でしばしば新たな問題を引き起こし，これでは“消えた太陽ニュートリノの謎”はとても解明されそうにないと思われる．そのため，もう一つの可能性すなわち，ニュートリノ自身に問題があるのではないか，という視点が注目される．

ニュートリノの問題

「MSW効果」は，あまりにも理路整然とした美しい現象である．そのため，自然がこれを利用しなさいと推奨しているように思える．結局，この効果は我々が熱望する有限質量を持つニュートリノの探索にたいして，曖昧な点がなく，論争の余地のない，そして明白で決定的な証拠を与えるかも知れない．[16]

ピータ・ローゼン，1986

デービスが，最初に太陽ニュートリノを捕まえる実験を思い立ったのが1950年である．その後，電子・ニュートリノ，ミュー・ニュートリノ，タウ・ニュートリノの3種類のニュートリノの存在が発見された．しかし，太陽内部における原子核反応からは，3種類のうちただ一つ，電子・ニュートリノのみが放

出される．そして，塩素実験で検出できるのは電子・ニュートリノだけである．それゆえ，ニュートリノがある種類から他の種類へと転換するなら，それが太陽ニュートリノ欠損について筋の通った説明を与えてくれるであろう．第4章で述べたように，転換する可能性は大いにある．

このような“ニュートリノ振動”の背景には，私たちが観測するニュートリノの状態は，基準の状態の量子力学的混合状態にあるという基本概念がある．そして，もしこれらの基準の状態が，わずかに質量が異なる状態であるなら，ニュートリノが空間を伝播するにつれて種類の転換を引き起こす．

量子レベルで起こるこの現象は，連成振動子の振動現象と同じである．連成振動子は，同じ弾性定数のバネを取り付けてある2個の振り子を，摩擦のない台の上において，それぞれのバネを左または右の壁に固定し，振り子間には異なる弾性定数のバネで連結したものである．一方の振り子を揺らすと，この振動はやがてもう一つの振り子に移っていく．そして，次に最初の振り子は一時的に静止状態になるが，その後，2番目の振り子から振動を吸収して，再び振動を開始する．

それでは，太陽内部で生成された電子・ニュートリノは，地球までの1億5千万 km を走行する間に，一部がミュー・ニュートリノかタウ・ニュートリノに転換するとしたらどうだろう．ホームステーク金鉱に到着した転換後のニュートリノはどれも，タンク内の塩素37によって捕獲されることなく，完全に観測の目をかいくぐるであろう．

確かに測定から求められる太陽ニュートリノの不足分（欠損）を，この方法で説明することは可能である．しかし，ここで考えているような単純な状態の混合が正しい解釈であるなら，それは驚くべきことである．量子力学的混合は，たとえば，クォークが弱い力によって崩壊するときなど，素粒子物理学の他の分野にも関係している．しかし，太陽ニュートリノで観測された欠損現象を再現するには，ニュートリノが自由空間を走行すると考えると，先例がないほど大きな混合率が要求される．それは，クォークの弱い相互作用を理解するのに必要な混合率に比べて，はるかに大きい．

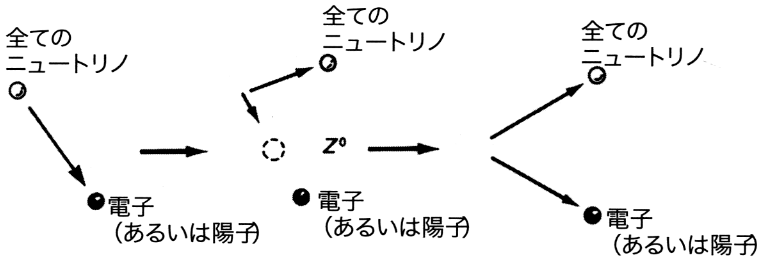
しかし，話はこれで終わりではない．1987年，ピッツバーグのカーネギーメロン大学のリンカーン・ウォルフェンシュタインは，ニュートリノ振動が物質の存在に影響されることを指摘した．というのも，太陽ニュートリノが

持っているような低いエネルギー領域では，電子・ニュートリノは物質中で電子と相互作用する際に，ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノには許されていない相互作用ができるからである．

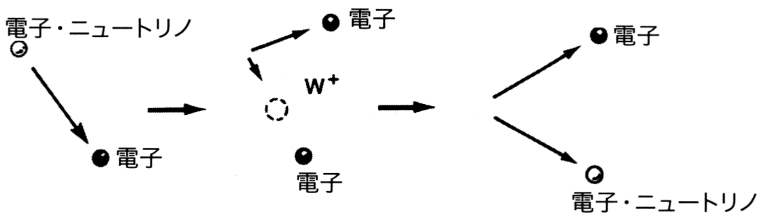
ニュートリノは弱い力を介してのみ，言い換えれば，荷電弱ボゾン（$W^{\pm}$）と中性弱ボゾン（Z^0）の交換によってのみ，素粒子と相互作用することができる（第 5 章参照）．ニュートリノは種類によらずどれも同等に，Z^0 粒子の交換から生じる“中性カレント”反応によって，物質中の電子や核子と相互作用することができる．だが，もう一つ別のタイプの反応，すなわち $W^{\pm}$ 粒子の交換をともなう“荷電カレント”反応がある．この反応では，電荷は反応の最中で所有者を換える．たとえば，W^- 粒子を受け取った電子・ニュートリノは電子へ，ミュー・ニュートリノはミューオン，タウ・ニュートリノはタウ粒子へと，ニュートリノは関連する負荷電粒子に転換する．しかしながら，太陽ニュートリノの典型的なエネルギー領域（$<$ 10MeV）では，電子と“荷電カレント”反応を起こすことができるのは，電子・ニュートリノだけである．ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノが関与する“荷電カレント”反応は，ニュートリノが質量の重いミューオンやタウ粒子を生成するのに十分なエネルギーを持っていないので起こりえない．

この電子・ニュートリノにのみ付与される相互作用は，ニュートリノの状態間の混合率が，走行する物質中の電子密度に依存するという効果を生み出す．太陽中心部は鉛の 10 倍という高密度である反面，太陽表面の密度はずっと低く，宇宙空間の密度より多少高い程度まで減少する．1985 年に，モスクワ原子核研究所の S. P. ミケーエフとアレクセイ・スミルノフは，ニュートリノが太陽中心部から出発して内部を走行する間に，混合率が変化すること，そして，太陽表面にたどりつくまでの間に，混合率が最大になる点が存在することを発見した．それなら，生成された電子・ニュートリノがミュー・ニュートリノに転換することは，十分可能である．

こうして，スミルノフとミケーエフは，不自然なほど大きい混合率でなくてもニュートリノ振動が起こることを示した．つまり，もともとの混合率は小さいけれども，電子・ニュートリノと電子との反応が増幅効果を持つため，ニュートリノを一つの状態から他の状態へと変えるのに十分な混合率が生じることになる．



Z^0 粒子交換による弱中性カレント



W^+ 粒子交換による弱荷電カレント

全ての種類のニュートリノは太陽の中で Z^0 粒子を交換して，すなわち弱中性カレントを媒介して，電子や陽子と反応する．しかし，弱荷電カレントを媒介する反応は，電子・ニュートリノと電子との間でのみ引き起こされる．それは太陽ニュートリノが，弱荷電カレントを介してミューオンやタウ粒子を作るだけの十分なエネルギーを持っていないことによる．一方，反ニュートリノに関しては，反電子・ニュートリノのみ，弱荷電カレントによって陽子と反応する．

MSW（ミケーエフ，スミルノフ，ウォルフェンシュタイン）効果は，太陽ニュートリノ欠損現象の要因として，もっとも信憑性がありそうだ．そんなMSW 効果に多くの物理学者が魅了された．これなら，そのほかの多くの解釈と違って，WIMP のようなまったく新しい物理を持ち出してくる必要はない．その上，MSW 効果は，素粒子標準理論を“大統一理論（GUT）”に拡張しようとするすう勢とうまく合致する．大統一理論は，強い相互作用と電磁弱相互作用を量子色力学と電磁弱理論の枠組みの中で，それぞれ別個に取り扱うのではなく，ひとまとめの体系として扱う．そして，この新しい大統一理論は，素粒子標準理論では説明できない問題，たとえば，素粒子にはな

ぜ固有の質量があるのか，とか，クォークとレプトンの2家族はなぜ3世代なのか，といった問題の解決に見通しを与えてくれるものと期待されている．

大統一理論では，クォークとレプトンは同じ数学的対称群の中に入る．それゆえ，ニュートリノを含むすべてのクォークとレプトンは，何らかの質量を持つべきであり，クォークとレプトンの間で互いに転換が可能になる．このような転換は，陽子が陽電子に崩壊する現象の中に現れる．ただ，転換を引き起こす力が弱いために，非常に長い時間を要する．これらの反応が弱いということは，力を媒介する粒子の質量が約 10^{15} GeV と非常に大きいことと関係している．この質量は，強い力と電磁弱力との区別がなくなるエネルギーに相当する．すなわち，W粒子やZ粒子の質量に等しい100 GeV付近のエネルギーで，電磁気力と弱い力が同等の役割を演じることと同じである．

素粒子標準理論では，ニュートリノは質量を持たない．そのため，ニュートリノ振動は起きない．もし，MSW効果が本当に太陽ニュートリノに作用していることが証明されれば，大統一理論は標準理論で説明しきれない物理の謎を解く重要な鍵を提供してくれるだろう．この点についてバコールは次のように言っている．

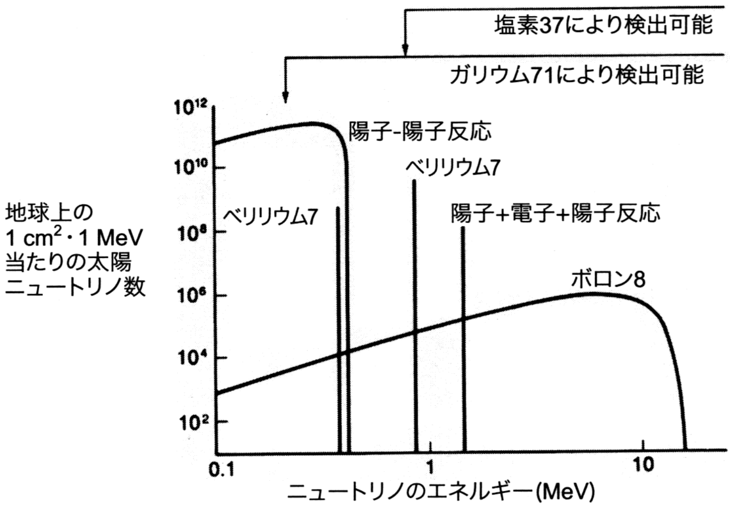
> 10^{15} GeV という大統一質量スケールについての情報は，10^{-12} GeV の微小なニュートリノの質量差によって引き起こされる相互作用から得られるのである．なんと驚異的で想像を絶する関連であろうか！[17]

ガリウム実験

ガリウム71を標的物質として使用することは，特に興味深い・・・．この実験で，予測値よりも十分小さいニュートリノ捕獲率が観測されれば，それは，ある種のニュートリノ振動を強く示唆することになるであろう．[18]

リンカーン・ウォルフェンシュタイン，ユージン・バイヤー，1989

デービスがちょうど検出器の建設を始めた1965年頃，モスクワにあるレベデフ研究所のウラジミール・クズミンは，太陽ニュートリノ捕獲について別の実験方法を提案した．クズミンはニュートリノを検出するには塩素37よりも，むしろガリウム71を使用すべきであると考えた．その大きな利点は，



太陽からやってくるニュートリノの大部分は，基本過程である陽子＋陽子反応で生成される低エネルギー・ニュートリノである．しかし，他にもベリリウム７の電子捕獲反応から生じる２つの特定のエネルギーを持つニュートリノや，頻度は少ないが陽子＋電子＋陽子の核融合反応で作られるニュートリノ，ボロン８の崩壊に伴って出てくるエネルギーの高いニュートリノなどがある．塩素検出器はエネルギーの高いニュートリノに対して，ガリウム検出器は陽子＋陽子反応で作られる低エネルギー・ニュートリノに対して高い検出能力を持っている．

ガリウム 71 が 0.23 MeV までの低エネルギー・ニュートリノを捕獲できることにある．ガリウム 71 は，水素からヘリウムへの転換過程の第一段階となる，陽子＋陽子反応から生成されるニュートリノを検出できる．最大の欠点は，ガリウムが塩素のようにどこにでもある物質でないことである．1965 年の時点では，ニュートリノ検出器のために数 10 トンのガリウムを使用するという考えは，原理的に不可能ではないとはいえほとんど非現実的であると思われた．バコールが指摘したように,「当時，実験で必要なガリウムの量は，世界の年間生産量より一桁以上も多い」.[19]

しかし，ガリウムは 1970 年代のマイクロ・エレクトロニクス革命の時期に，半導体工業の中で新しい役割を担うようになった．それは，特殊の用途で，いたるところにあるシリコンを上回る特性を持つ物質であることによる．

そして 70 年代の後半になると大量のガリウムの生産は，もはや不可能ではなくなった．そこで幾人かの研究者は，ガリウムを用いた太陽ニュートリノ検出器の可能性について真剣に検討し始めた．

その後クズミンの提案から 25 年たった 1990 年に，ガリウム検出器による最初の実験結果が報告された．その結果に対して，ほとんどの研究者がびっくり仰天した．この新しい実験で検出されたニュートリノの数は，太陽標準理論の予測よりもずっと少なかった．それどころか，基本過程である陽子＋陽子反応で生成されるニュートリノは，検出されていないかのようであった．ミケーエフ，スミルノフ，ウォルフェンシュタインによって提案された物質中でのニュートリノ振動を示す，最初の強力な証拠を見ているのではなかろうか．その可能性に，誰もが興味をそそられた．

ほぼ十分な量のガリウムを備えた最初の大型実験がソビエト連邦（当時）に建設されデータ収集を開始した．このバクサン・ニュートリノ観測所は，アジアとヨーロッパの辺境に位置するコーカサス山脈の最高峰エルベス山（5462m）からほど近い，バクサン渓谷沿いのアンディルチ山の地下に掘られた空洞の中にある．ここが，SAGE 実験(Soviet – American Gallium Experiment)の本拠地である．実験装置は，V. N. ガブリンとジョージ・ザセピンが率いるモスクワ原子核研究所と，ロスアラモス国立研究所，デービスのいるペンシルバニア大学，ルイジアナ州立大学，プリンストン大学からなるアメリカ・グループとの協力によって完成した．

ガリウムはユニークな金属で，温度が 30°C から 2000°C までの広い範囲で液体である．自然界には 2 種類のガリウムが存在する．31 個の陽子と 38 個の中性子で構成されるガリウム 69 と，31 個の陽子と 40 個の中性子を持つガリウム 71 である．ニュートリノの検出に使用されたのは，自然界での存在比が 40%のガリウム 71 だった．ガリウム 71 原子核は，中性子の中の 1 個が電子・ニュートリノを捕獲すると陽子に変換し，ゲルマニウム 71（32 個の陽子と 39 個の中性子で構成）になる．しかし，このようにして作られたゲルマニウム 71 は，半減期 11 日で崩壊する．この崩壊は，ゲルマニウム 71 の陽子の 1 つが軌道電子を捕獲する時に起こり，ゲルマニウム 71 は再びガリウム 71 に戻る．塩素検出器の中でのアルゴン 37 の崩壊とまったく同じく，ニュートリノ捕獲は反応後の原子核が安定な状態に落ち着く過程でオージェ

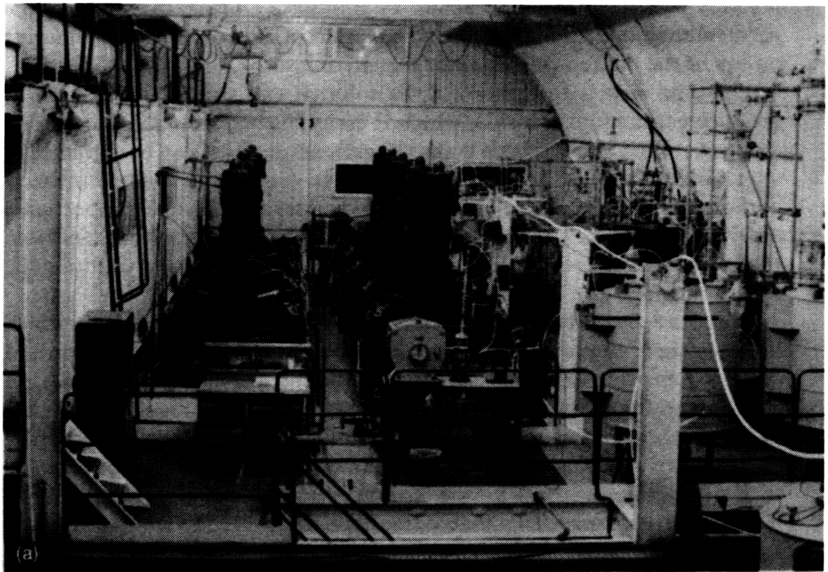


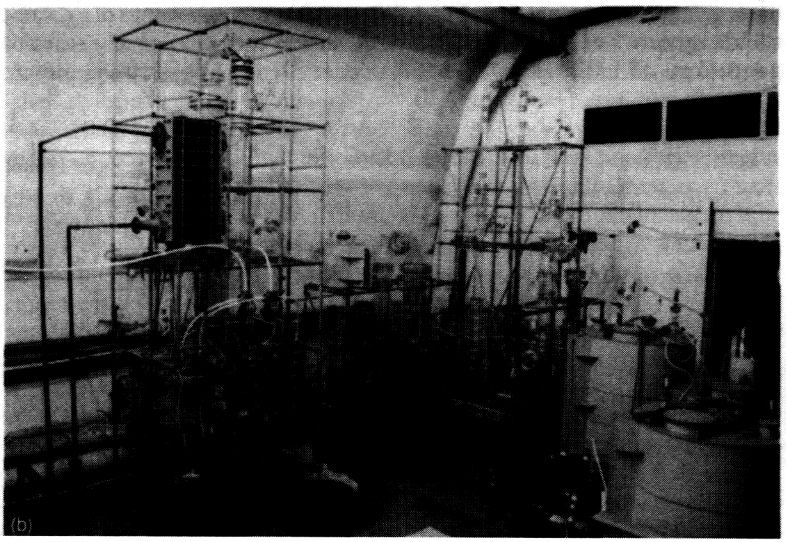
片側が木々で覆われたアンディルチ山の急斜面に囲まれたバクサン峡谷．いろんなタイプの地下実験室が，4km 以上におよぶトンネルに沿って立ち並んでいる．この写真の中央近くの建物の左上にある壁が入口である．SAGE 太陽ニュートリノ検出器は，入口から 3.5km，頂上直下 2km の山中にある．(D．ワーク：SAGE 提供)

電子の放出を誘発する．

SAGE 検出器に使用されているガリウムは，反応容器の中で温度約 30°C で液状に保たれている．実験開始時には，一定量の非放射性の安定なゲルマニウムが検出器内の液体に添加される．研究者は約 20〜30 日後に，このゲルマニウムとニュートリノによって生成されたゲルマニウム 71 を同時に取り出す．ゲルマニウムを抽出するには，反応容器内の液体金属に塩化水素と過酸化水素の溶液を添加する．そして約 15 分間，十分 “攪拌する”．その間にゲルマニウムは酸性側に移動し，攪拌を止めるとガリウム液の上部に集まって液層を作る．

次の処理工程で，上澄み液を吸い上げて塩化ゲルマニウムを生成するための濃縮を行う．この塩化ゲルマニウムは，アルゴンガスによって溶液から容易に追い出すことができる．この工程が終了すると，ゲルマニウムそのものは一連の反応処理をほどこされたのち，ゲルマニウム・ガス（GeH_4）試料と





（a）SAGE 実験の反応タンクを収納する地下実験室の側面写真．攪拌用のモータが，それぞれのタンクの頭部に取付けられているのがはっきりと見える．タンクは全部で10 基あり，このうち右側の 4 基だけがガリウム 30 トンによる初期の実験で使用された．右の壁側が複雑な化学的手法による抽出システムである．より詳細なシステムの配列が（b）からわかる．(T. ボウロー：SAGE 提供)

して摘出される．その量はせいぜい 1 cm^3 ほどである．次にこの試料は小型の比例計数管の中に置かれ，ゲルマニウム 71 の崩壊が測定される．崩壊数の計測は太陽ニュートリノを数える鍵となる．

SAGE 検出器には全部で 8 基の反応容器があり，計 60 トンのガリウムを蓄えている．それぞれの容器には実験データ収集期間が終了した時点で，重要な工程である混合が行なえるよう電動攪拌機が取り付けてある．SAGE は最初，4 基の反応容器にガリウム 30 トンを満たして実験を始めた．そして，18ヶ月におよぶ予備実験ののち，1990 年初頭に正式なデータ収集を開始した．実験チームは 1990 年 6 月に，ジュネーブの CERN で開催されたニュートリノ '90 国際会議で最初の結果を報告した．その結果は驚きそのものであった．SAGE が太陽ニュートリノをまったく検出していないのである．

太陽標準理論が予測したガリウム実験における太陽ニュートリノの捕獲率は，132 SNU である．その大部分を占めるのは太陽ニュートリノの中の主成分で，基本的な核融合過程 "陽子＋陽子反応" から生成されるニュートリノである．この捕獲率によれば，ガリウム 30 トンを用いると，5ヶ月間の稼働期間後に抽出される試料から，計 20 個のゲルマニウム 71 の崩壊が計測されなければならない．実験チームはゲルマニウム 71 崩壊の半減期の 5 倍以上に相当する 60 日間，各抽出試料を計測して数個の信号を検出した．だが，ありとあらゆる徴候から判断して，そのどれもがゲルマニウム 71 の崩壊ではなく，ほかの反応過程で生じた招かざる客，すなわちバックグランド現象による信号と考えられた．

もし，比例計数管で計測したのが本当にゲルマニウム 71 の崩壊によるものなら，計測数の割合は半減期を反映するはずである．つまり，半減期は 11 日なので 11 日ごとに計測すると，2 回目の計測値は 1 回目のそれの半分になるはずである．しかし，検出された計測数は何回目の計測であろうと変わりなく，それはいろいろな種類のバックグランド源が存在するときに予想される計測状況とそっくりであった．一体全体，太陽ニュートリノに何が起こったのだろうか．陽子＋陽子反応から生成される低エネルギー・ニュートリノだけでも，5ヶ月間に少なくとも 10 個は計測されてしかるべきなのに．興奮せずにはいられない解釈が一つの可能性としてある．それは，答えが MSW 効果に潜んでいるという解釈である．

コーネル大学のベーテ（1938年に星の進化過程で，水素からヘリウムへ転換する基本過程の一つである炭素燃焼サイクルを提案）は，MSW効果に注目した最初の一人であった．1986年3月に，彼はフィジカル・レビュー・レター誌に,「太陽ニュートリノ問題で考えられる解釈」という題名の論文を発表した．ベーテはMSW効果の解の一つに，ある一定以上のエネルギーを持つ電子・ニュートリノは，常にそのタイプを転換できることを指摘した．そして，その臨界エネルギーを計算するために，太陽標準理論からの予測値と塩素実験で検出されたニュートリノ数の割合を用いた．さらに，彼はガリウム実験では臨界エネルギー以下のニュートリノをおもに検出しているため，ニュートリノ欠損は少なく10%ほどだろうと推測した．ほどなくして，ロスアラモス国立研究所のピータ・ローゼンとJ. M. ゲルプは，MSW効果の異なる解をもとに議論を展開した．こちらの解はMSW効果はむしろ，低いエネルギーの太陽ニュートリノに対して顕著になることが示される．そしてローゼンとゲルプは，ガリウム実験で検出されるニュートリノ数が太陽標準理論からの予測値より，90%も少ない計算結果を出した．

カミオカンデ－IIの最初の結果は，ベーテの解に決定的な打撃を与えた．この実験は比較的高いエネルギーの太陽ニュートリノのみを測定できるにも拘わらず，予測値に比べて塩素実験よりも多くのニュートリノを検出した．その後1990年6月に，ベーテはバコールと共著で「太陽ニュートリノ問題の解」（最初の論文にあった「考えられる」という語が無くなっている）と題する論文をフィジカル・レビュー・レター誌に投稿した．彼らは0.814 MeV以上のエネルギーのニュートリノを捕獲する塩素実験では検出数が予測値の1/3以下で，一方，当時7.5 MeVのエネルギー閾値を持つカミオカンデでは予測値の約1/2の数が検出されていることに注目した．ニュートリノになにが起こっているにせよ，その効果はどうやら，ニュートリノのエネルギーが低くなればなるほど大きくなるらしい．

バコールとベーテはそれゆえ，MSW理論の第二番目の解（ローゼンとゲルプの解）を採用することにした．そして，塩素実験における予測数が検出数と等しくなるように，ニュートリノ振動理論の中のパラメータを決定したところ，カミオカンデ－IIの結果が驚くほどよく再現できることを示した．MSW効果のこの解は，ほぼすべての低エネルギーの電子・ニュートリノを

ほかのタイプのニュートリノに転換してしまう．このため，ガリウム実験における捕獲率は，太陽標準理論が予測した 132 SNU よりもはるかに少なく 5 SNU となる．この捕獲率は SAGE がもう少しデータを集積して統計精度が向上すれば，確認できる範囲にある．

これらの結論はこの上なく興味をそそる．もし，これが正しければ，20 年来の謎が解けるのだがそれだけではない．素粒子標準理論を越えた新しい物理の扉が開かれるのである．MSW 効果は，ニュートリノが相異なる質量の基本状態の重ね合わせで記述される時にのみ起こる．バコールとベーテは，ニュートリノの基本状態の混合がクォーク間の混合と等しいと仮定すると，彼らの振動解はニュートリノの基本状態の質量の 2 乗差がわずか $2\times10^{-7}\mathrm{eV}^2$ に対応する．これは，ニュートリノが単純な質量 0 の素粒子ではないことを示す，最初の証拠となりえるのか．

「そうだ」と断言するには相補的な確証が必要である．しかしながら今度は，デービスの時と違ってほかの実験結果が現れるのを 20 年も待たずにすんだ．二番目のガリウム実験装置が 1990 年には完成間近になっていた．こちらはイタリア中央部の山脈の地下にあった．

1978 年 5 月，バコールとデービスと共同研究者たちは，クズミンの発案に基づく 50 トンのガリウムを用いた新しい太陽ニュートリノ検出器を提案した．デービスはその後，ドイツのハイデルベルグにあるマックス・プランク原子核研究所のティル・キィルステンとチームを組み，1.3 トンの試験用ガリウム検出器を用いて多くのテストに成功し，実り多い共同研究を行なった．彼らは最終的にガリウム検出器は実現可能であることを証明し，アメリカとドイツの共同による本実験用の検出器の建設を提案した．しかし，アメリカの財政当局に働きかけて，必要な資金を出させようとしたものの失敗に終わった．

一方，キィルステンはその後，ドイツでこの計画を温めていた．そして，西ドイツ（当時）から 30 トンのガリウムを購入する資金として，全実験経費のおよそ半分にあたる約 2000 万ドイツ・マルクを獲得することに成功した．彼はまた，イタリアのローマから 150km 北東に地下実験室に好適な場所を見つけた．そこは，イタリア半島を縦に走る山脈の一部で，標高が 2900m を越えるグランサッソの山中である．イタリア当局はすでに，この地域の山々

を貫く新しいトンネル道路を作る決定を下していた．そして，1981年に国立原子核物理学研究機構（INFN）の総裁であるアントニオ・ジキキは，道路建設に便乗し掘削する範囲を拡大して高速道路の脇に地下研究所を建設してはどうかと提案した．建設地は標高約1200m，研究所は1400mの岩山で覆われている．これなら，宇宙線によるバックグランドの少ない高精度実験を可能にする環境が整う．

ついに研究所は完成した．同研究所の主要な実験の一つは，30トンガリウム実験である．これは，"gallium experiment" からGALLEXと名づけられ，1987年国際チームによって実験が開始された．そのメンバーは，キィルステンをリーダとし，ヨーロッパのグルノーブル，ハイデルベルグ，カールスルーエ，ミラノ，ニース，ローマ，サックレイ，イスラエルのロホーベット，アメリカのブルックヘーブン国立研究所の研究者たちで構成されている．GALLEXはいろいろな点でデービスの先駆的な塩素実験とよく似ている．たとえば，ガリウムは塩化ガリウム（$GaCl_3$）と塩酸の混合液の状態で使用される．また，ニュートリノを捕獲したときに生成される塩化ゲルマニウム（$GeCl_4$）分子は，窒素による脱泡処理によって液体中から抽出される．最後に，摘出されたゲルマニウムのサンプルは純化処理されたのちに，小型比例計数管に入れられゲルマニウムの電子捕獲過程による崩壊が観測される．

30トンのガリウムは生成されるゲルマニウムの抽出を容易にするために，塩化ガリウム水溶液の状態で蓄えられる．その総重量は100トンになる．塩化ゲルマニウムは窒素ガスによる脱泡処理によって溶液から追い出される．そのあとの処理工程はSAGEと同じである．ゲルマニウムは一連の処理を経て塩化ゲルマニウムから抽出され，さらにゲルマニウム・ガス（GeH_4）に変換されたのち比例計数管に封じ込められる．GALLEXは，1991年にデータ収集を開始した．そして，本書を執筆している時点（1992年1月）ではまだ，SAGEの最初の結果が正しいかどうかを判定する段階まで来ていない[注4]．

これらのガリウム実験は，"消えた太陽ニュートリノの謎" を解き明かして

注4 GALLEXはその後データを蓄積し，測定結果は理論予測値の60%であった．そしてp–pニュートリノを含む太陽ニュートリノ問題を再確認した．一方，SAGEは時間とともに太陽ニュートリノの検出数が増え，最終的にはGALLEXと同様，理論予測値の58%となった．GALLEXは1996年に，SAGEは2006年に実験を終了した．



イタリアのグランサッソ研究所に備付けられる GALLEX 太陽ニュートリノ検出器の主要部分の大型タンク．この中に 30 トンのガリウムを含む高純度の塩化ガリウム溶液 50 m^3 が収納される．写真は 9.5 m の長さのタンクが地下実験室に向かうところ．(キィルステン：GALLEX 提供)

くれるだろうか．ガリウム実験は確かに，今後の研究の指針を研究者に与えてくれる．しかし，太陽ニュートリノが実際に MSW 効果から予測されるような振る舞いをするかどうかを知るには，そのほかの基本的な情報，たとえばニュートリノのエネルギー分布などが不可欠となる．MSW 効果は，ある特定のエネルギー領域の電子・ニュートリノをほかの種類のニュートリノに転換する．そのため，電子・ニュートリノのエネルギー分布を大きく変形させる可能性があり，エネルギー測定は特に重要になる．多くの物理学者の夢は，いろいろな理論から予測される現象を識別できるだけでなく，一つの理論から導かれるさまざまな現象をも特定できる十分な測定精度をもつ実験によって，太陽ニュートリノのエネルギー分布を測定することにあった．

軽水と重水

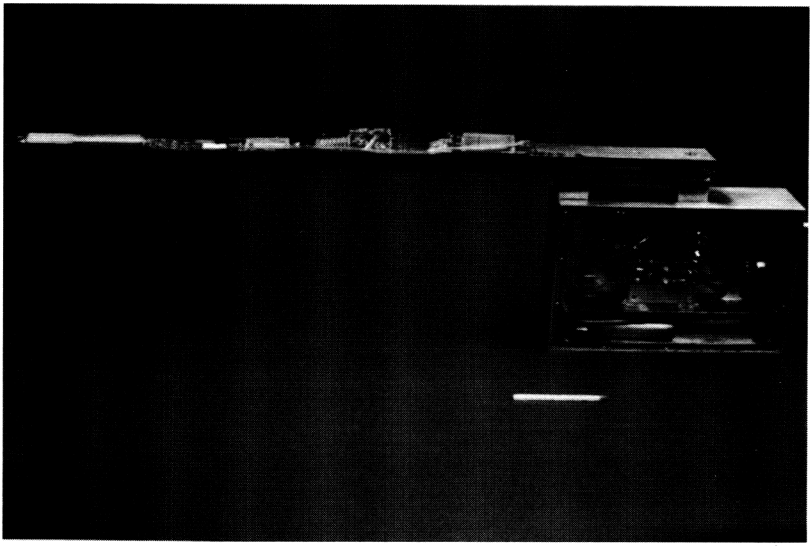
最近，大型重水チェレンコフ検出器によってボロン 8 太陽ニュートリノを観測する可能性が，・・・現実化してきた．この実験が真剣に検討される背景には，陽子崩壊を検出するために大深度地下に建設された，軽水チェレンコフ検出器（カミオカンデ）の実験が成功しているからである．[20]

ハーバート・H・チェン，1985

低エネルギー・ニュートリノのように捕らえどころのないものを測定し，そのうえエネルギーをも計測するということは，まったく途方もない要求である．しかしながら，このような挑戦には確かに，ニュートリノ実験に夢中になっている人たちをわくわくさせる何かがある．地球にやってくる太陽ニュートリノがもたらす情報の中には，塩素実験やガリウム実験で明らかにされないものもある．たとえば，“ニュートリノが検出された正確な時刻はいつか”，“ニュートリノはどの方向からやってきたのか”，そして，“ニュートリノが太陽からの道中で，電子・ニュートリノからほかの種類に転換するなら，転換後のニュートリノを測定することは可能なのか”．

世界中で幾つかのチームが，これらの問いの一部またはすべてに答えを与える検出器を提案している．これらの提案が実現可能であることは，すでに日本のカミオカンデ II 検出器において実証された．カミオカンデ II は，太陽の方角と一致する方向からやってくるニュートリノを，確かに検出していることを示した．

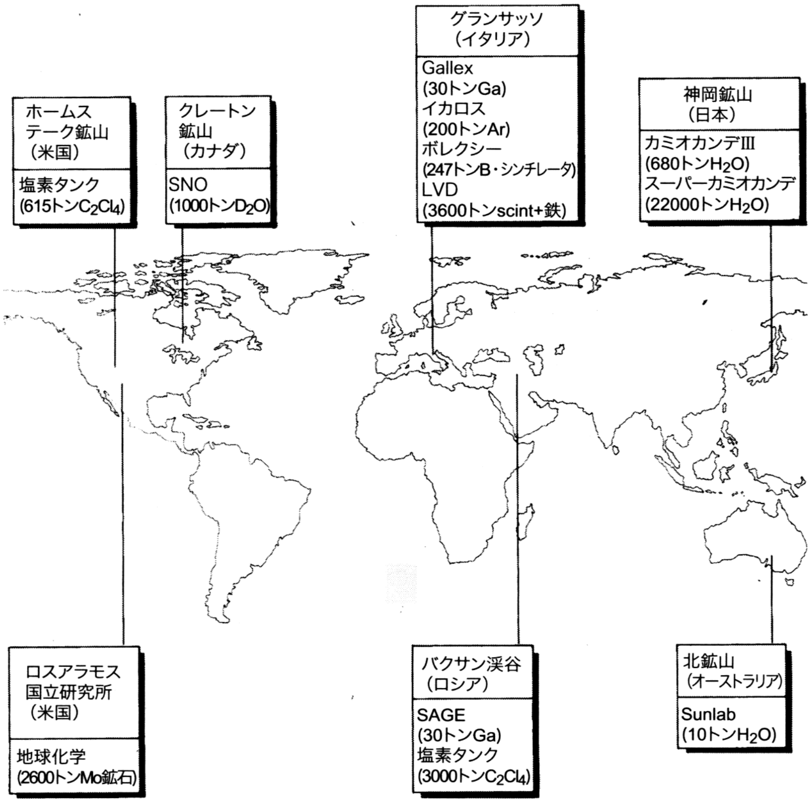
カミオカンデ II は 3000 トンの水を使用しているが，太陽ニュートリノ測定に利用されるのは，そのうちの中心部の 680 トンだけである．それは，検出器の外周に近い部分が，周辺の岩盤から侵入する膨大な数のガンマー線や中性子を検出してしまうからである．680 トンのみ使用する場合，ニュートリノ反応は 6～7 日の 1 回と，少なくなる．しかし，カミオカンデ・チームは，実験規模を飛躍的に大きくしたスーパーカミオカンデ装置の建設を提案し，その予算が承諾された．スーパーカミオカンデでは，太陽ニュートリノ検出に使用できる水の量が 22000 トンで，さらにチェレンコフ光検出能力はカミオカンデ II の 2 倍である．これくらい大型になると，1 週間分のニュートリノ検出数から，太陽中心部の温度を 1%の精度で測定できる温度計にな



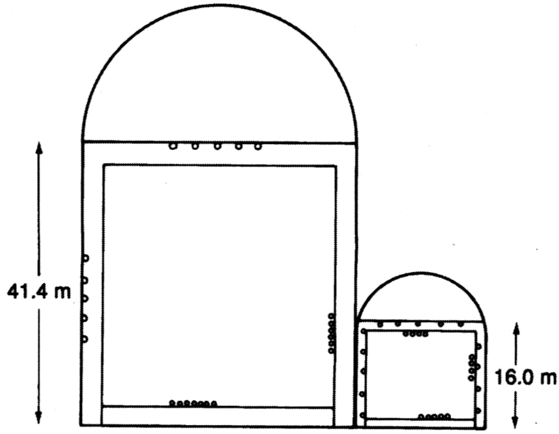
GALLEX 太陽ニュートリノ検出器から摘出されるゲルマニウム・ガスを詰めた，小型サンプルの計測用比例計数管．この計数管は，ゲルマニウム 71 が崩壊してガリウム 71 に戻る全ての崩壊モードを計測する．このような崩壊を検出することは，太陽ニュートリノによって検出器内にゲルマニウム 71 が生成されたことを知らせてくれる．(キィルステン：GALLEX 提供)

るだろうと実験チームは強調している．その上，スーパーカミオカンデは宇宙ニュートリノ（第 7 章参照）にたいしても，並外れた性能を持つ観測装置である．一方，カミオカンデ II は，スーパーカミオカンデで予定されているデータ収集電子回路の原型となる新しい電子回路を装備して性能向上をはかり，カミオカンデ III となった．

しかし，もっとも強力な水検出器はおそらく，カナダのオンタリオ州サドベリーにあるクレイトン鉱山の地下 2070m に建設されるものであろう．ここで実験を行なうのは，オンタリオ州クィーンズ大学のジョージ・ユーワンが率いる，カナダ，アメリカ，イギリスの共同チームである．もっとも高性能な太陽ニュートリノ検出器といって間違いない，このサドベリー・ニュートリノ観測装置の特徴は通常の水ではなく，水素原子核が重陽子原子核（陽子に中性子が束縛されている原子核）に置き換えられた水，つまり重水を用いるところにある．この検出器をつくろうと提案したのはカリフォルニア大学



現在，世界中に数多くの太陽ニュートリノ検出器がある．これらは提案中のものから，建設が終了して実験が始まっているものまでさまざまである．この地図は，既に検出器が建設されているもの，建設さなかのもの，少なくともテストベンチが建設されているものなど主要な検出器を示す．また，図では検出器をトン単位で表したおおよその大きさと，ニュートリノと反応する物質が記述されている．Ga はガリウム，C_2Cl_4 は2塩化炭素，H_2O は水，Ar はアルゴン，B はボロン，scint はシンチレータ，Mo はモリブデン，D_2O は重水を表す．



提案されたスーパーカミオカンデ検出器は，ニュートリノ反応を検出する有効体積が，現存するカミオカンデIIの30倍である．これだけの大きさを有すると，年間の太陽ニュートリノ検出数は8000以上になり，昼夜変動や季節変動を数%の精度で計測できる[注6].

アーバイン校のハーバート・チェンで，彼の頭脳のひらめきのおかげと言ってよい．彼は，この提案をカナダの研究者にもちかけて議論した．それはカナダが原子炉に使う大量の重水を製造しているからであった．しかし悲しいことに，彼は実験プロジェクトが承諾される前に病死してしまった．

ただ一種類の反応によってニュートリノを検出する塩素やガリウム検出器と違い，重水検出器は3種類の異なる反応過程をとおしてニュートリノの種類を同定することができる．観測される頻度がもっとも高いのは，塩素実験やガリウム実験で観測されているのとまったく同じ，重陽子原子核がニュートリノを吸収して重陽子中の中性子が陽子に変わる反応である．この場合，反応によって発生する電子が注目の的となる．電子は，ニュートリノがもともと持っていたエネルギーの大部分を持ち運ぶ．そして，このエネルギーは，円

注6 スーパーカミオカンデは1996年に建設が終了し，4月1日より実験を開始した．そして，1998年に宇宙線が地球大気に突入した際に生成される大気ニュートリノの振動現象を発見し，初めてニュートリノが有限の質量を持つことを実証した．



サドベリー・ニュートリノ観測所計画のリーダの一人であるジョージ・ユーワン（前列右）．他は共同研究者とバコール（前列中央）．1987年夏にクウィーズ大学で，初期の計画を議論しているところ．

錐状に放射されるチェレンコフ光として測定される．重水検出器が測定できるのはカミオカンデと同じく，5 MeV 以上のエネルギーを持つ電子のみに限られる．このため，ボロン8によって生成されるニュートリノだけが捕獲される．しかし，1000トンもの重水があると，太陽標準理論から予測されるボロン8ニュートリノの量を1年間にわずか1%の統計誤差で決定できる．これは1日約30個の検出数に相当する．その上，重水検出器はニュートリノのエネルギー分布も測定できる．よって，太陽からの途中，ある特定エネルギーを持つ電子・ニュートリノが，他の種類のニュートリノに転換する MSW 効果が確認されるであろう．

この検出器はまた，上記の吸収過程のわずか10%の反応確率とはいえ，カミオカンデと同じくニュートリノが電子を蹴り出す反応（ニュートリノ－電子散乱）を通して，ニュートリノを検知することも可能である．しかしなが

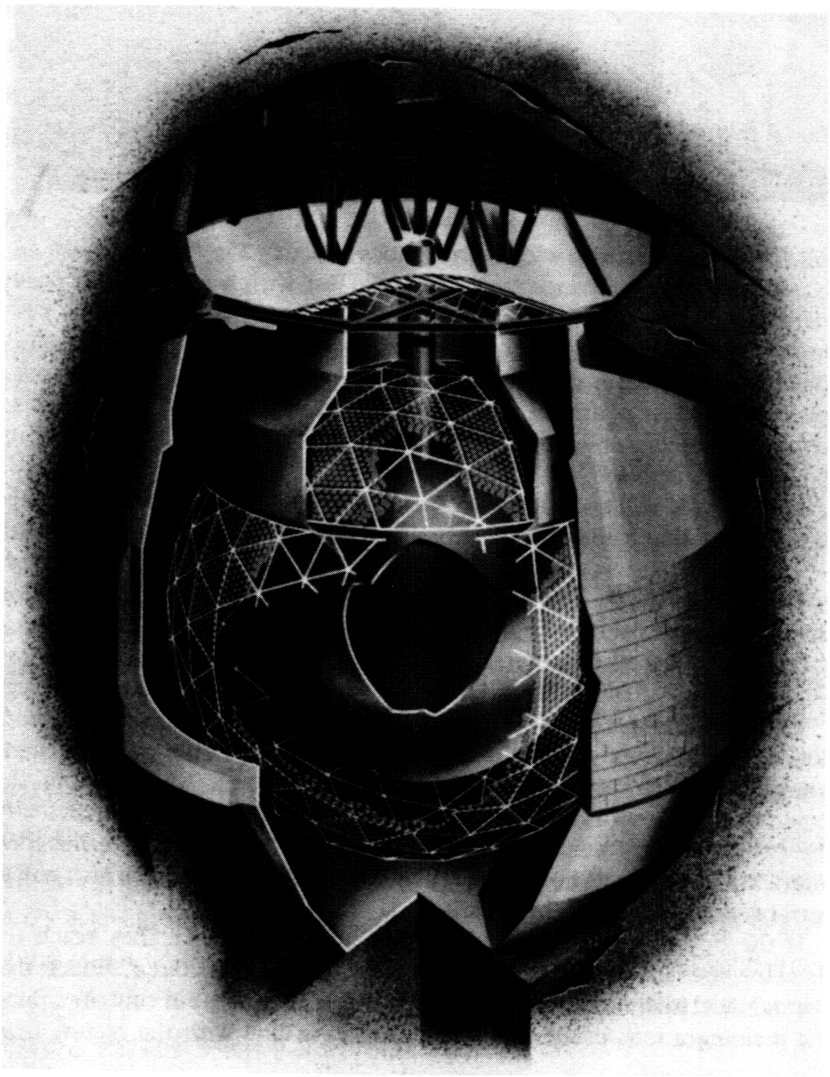
ら，太陽ニュートリノ検出器としての重水の強みは，第3の反応過程がものをいう．これは，中性カレント（中性弱ボゾンの交換）を通してのみ引き起こされる．そのため，この反応は3種類のニュートリノにたいして等しい確率で起こる．したがって，たとえニュートリノの種類が変化してもこの反応によって検出される．

第3の反応過程の重要な点は，ニュートリノと重陽子がともに他の粒子に変わることなく，重陽子が陽子と中性子に分解するだけである．この時，ニュートリノは単にある量のエネルギーを重陽子に手渡すのみで，ほかに何事もなかったかのように走り去っていく．コーワンとライネスの実験の場合と同じく，この反応の検出の鍵は中性子が握っている．ニュートリノ反応において重陽子の束縛から解放された中性子は原子核に捕獲され，次に原子核はガンマー線を放出することによって余剰のエネルギーをはき出して安定な状態に落ち着く．そして，このガンマー線が円錐状の光信号を発する．

もし，ボロン8ニュートリノが検出器に到達する前にその種類を変えたとしても，重陽子分解はやはり太陽標準理論によって予測される割合で起こるはずである．というのは，この反応はニュートリノの種類を選ばない．しかし，重陽子分解反応が予測より少ない割合で起こるなら，デービスの実験結果と考え合わせると，太陽に関する何かが問題なのだと考えざるを得なくなるだろう．

サドベリー・ニュートリノ観測装置を建設している研究者が直面している課題は，なにがあろうとくじけないことにつきる．西側諸国（ソ連崩壊前の，ソ連，東欧の共産主義圏の東側にたいする対語）の中でもっとも深い鉱山の1つを選んだことから，実験チームにとって主たる難題は宇宙線ではなく，多量の自然放射能である．これは特に，重陽子分解によって生じた中性子を検出するときに問題になる．コーワンとライネスの時と違って，今回は招かざる客の中性子とお望みのニュートリノ反応による中性子とを識別する遅延同時計測に必要な先発信号がない．極めて難しい課題ではあるが，そこから得られるものは計り知れない．スティーブン・ワインバーグは次のように強調した．

…今や，太陽ニュートリノを中性カレント反応によって検出しようとする実験は，非



サドベリー・ニュートリノ観測所（SNO）は，オンタリオ州の鉱山の地下 2070 m に掘削した 30 m の高さの空洞に建設された．この図の中央部にある透明なアクリル製の球形容器に，1000 トンの重水が蓄えられている．重水の全周囲は 7300 トンの水で覆われ，球形状のフレームに取付けられた 6400 本の光電子増倍管がニュートリノ反応を見つめる．

常に重要になった．… ここには，太陽がどのように活動しているのかという興味深い問題より，もっと重大な問題が存在する．ニュートリノ振動は，物質振動（MSW効果）であろうとなかろうと，そもそもニュートリノがそれぞれ異なる質量を持っていなければ起こらない．そして，ニュートリノが有限質量を持つことが確認されれば，素粒子物理学のもっとも深遠な疑問の幾つかが解明されることになる[注7][21]．

完璧な検出器？

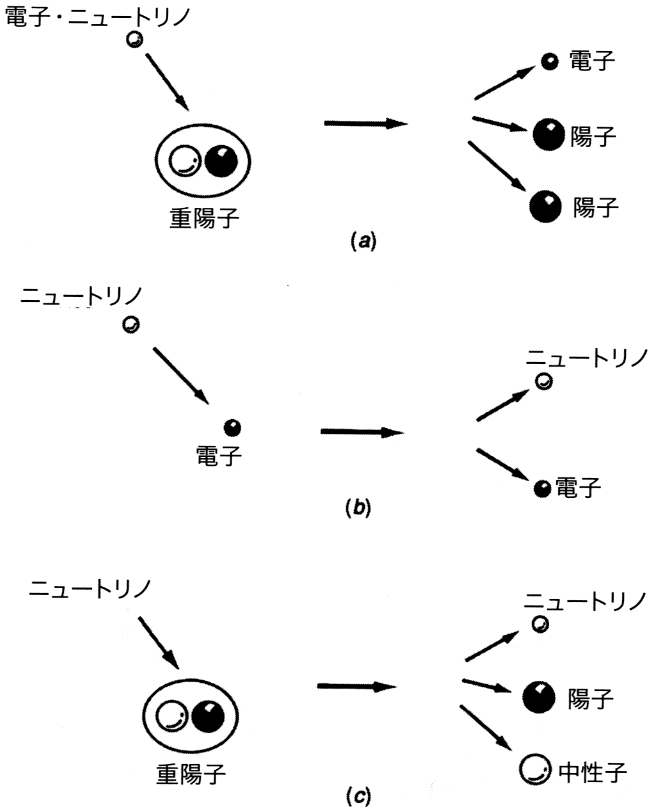
この実験は必ず成し遂げなければならない．[22]

ノーマン・ブース，1980

これまでに述べてきたニュートリノのエネルギーを測る実験はすべて，ボロン8崩壊によるエネルギーの高い太陽ニュートリノのみを検出するものである．理想的な太陽ニュートリノ実験とは，太陽燃焼炉に火をともす基本的な融合反応，つまり陽子＋陽子反応から生じるニュートリノのエネルギーを測定できる実験であろう．このような実験の一つでインジウム115をニュートリノ標的として使用する実験が，1976年にベル研究所のR.S. ラガバンによって提案された．

インジウム115（陽子49個と中性子66個から構成）はニュートリノを捕獲し吸収すると，錫（陽子50と中性子65個から構成）に変わる．この錫115は形成された直後は励起状態にあるが，約3マイクロ（3×10^{-6}）秒後に2個のガンマー線を放出して基底状態に戻る．インジウムが錫に変わるときに生成される電子と，3マイクロ秒後に放出される2個の特定のエネルギーを持つガンマー線を測定することによって，インジウムがニュートリノを吸収した証が得られる．この反応の重要な点は，太陽燃焼の第一歩の陽子＋陽子反応によって生成されるニュートリノの最大エネルギー（0.42 MeV）よりもかなり低い，0.12 MeV以上の低エネルギー・ニュートリノによって引き起こされることである．

注7 SNO実験は1998年に実験を開始した．そして2002年に，荷電カレント事象と中性カレント事象のデータから，太陽ニュートリノである電子ニュートリノが他の種類のニュートリノに転換する現象を発見し，太陽ニュートリノ欠損現象の原因を突き止めた．



SNO は，3 種類の反応によってニュートリノを検出する．その反応とは，(a) 逆ベータ崩壊：この反応は，電子・ニュートリノが重陽子に捕獲される時に起こり，生成される電子のエネルギーを測定することによって，ニュートリノのエネルギー情報が得られる．(b) ニュートリノ・電子散乱：どのタイプのニュートリノもこの反応を起こすけれども，電子・ニュートリノと電子との散乱頻度がより多い．(c) ニュートリノ・重陽子による中性カレント反応：ニュートリノの種類を問わず，反応が起こる．“消えた太陽ニュートリノ”問題に答えを与える MSW 理論の重要な検証となる．

ではどうしてこれまで，インジウムを用いた太陽ニュートリノ検出器を誰も作ろうとしなかったのだろうか．それは，今までの実験とは別の難題を克服しなければならないことがわかっていたからである．というのは，インジウム自身が自然放射性物質であることに由来する．その半減期は約 400 兆年

と長い．しかし，インジウム 1kg あたり 5×10^{24} 個のインジウム原子核があるので，これが自然放射性崩壊を起こす確率は，太陽標準理論から予測される太陽ニュートリノの捕獲率の 1000 億倍にもなる．しかも，インジウムの自然ベータ崩壊によって放出される電子の大部分は，ニュートリノ捕獲による電子と似かよったエネルギーを持っている．

しかしながら手が出ないわけではない．励起状態の錫の原子核から 3 マイクロ秒後に放出されるガンマー線は，コーワンとライネスが用いたのと同様の遅延同時計数法を適用することによって，ニュートリノ捕獲で生成される電子を識別する唯一の手段を提供してくれる．これらのガンマー線のエネルギーは 116 keV と 497 keV であることが確認されている．しかも，エネルギーの低いガンマー線は，インジウム中で 1 mm も走行しないうちにエネルギーを放出する．そのためこのガンマー線の信号は，3 マイクロ秒前に生成された電子のすぐそばで生じるはずである．

電子とガンマー線はどのようにすれば検出できるだろうか．インジウムを溶かした液体シンチレータを使用する方法が一つの案である．しかし，初期のテスト実験で，インジウム自身のベータ崩壊や外からまぎれこんでくるガンマー線などのバックグランド現象と区別して，太陽内の陽子＋陽子反応による低エネルギー・ニュートリノを検出することは，事実上，不可能なことがわかった．1980 年前半に，オックスフォード大学のノーマン・ブースと彼の共同研究者は別の方法を検討していた．それは，インジウムの超伝導体としての特質を利用する方法である．インジウムは，絶対温度が 3.4 K 以下の極低温で超伝導状態になる，すなわち電気抵抗がなくなる．超伝導状態になると，電気伝導に寄与していた電子は 2 つ一組になって，ゆるやかに結びつく．このペアになった電子（電子対）は，金属を構成する格子状の原子のまわりを容易に移動することができる．高いエネルギーを持つ電子やガンマー線は，超伝導状態のインジウム内を通過するときに，電子対の結合を断ち切って電子を解放する．インジウム・ニュートリノ検出器の目的は，これらの解放された電子を何らかの方法で測定することである．ここで測定される信号の大きさは，電子やガンマー線が検出器に付与するエネルギーに比例する．

最近になってオックスフォード・チームは方針を変え，純度の高い柔らかいインジウム金属ではなく，取扱いがもっと簡単なインジウム・アンチモン合

金で検出器を作ることにした．これなら電子やガンマー線は，それらが誘起する音波（結晶中の原子の格子構造の振動）を通して測定される．この音波は，超伝導体でも測定されるが，ここでは，インジウムの表面に装着したアルミニウム膜で測定される．数グラムのインジウム・アンチモンを含んだ結晶を用いた最初の実験結果は，今後に期待をいだかせるものであった．ブースと共同研究者は，1 keV 以内のエネルギー分解能と高い検出効率を駆使して，60 keV のガンマー線を測定した．

非常に興味深いことに，太陽内でベリリウム7によって生成されるニュートリノは，太陽内部の熱運動のために約 1 keV のエネルギーの不確定さを持つことが予想される．ベリリウム7は，太陽内部でヘリウムを作る反応連鎖の 15%を占める．一部のベリリウム7は陽子を捕獲して，ボロン8を作る．このボロン8は，塩素実験や神岡実験で検出される比較的エネルギーの高いニュートリノを生成する．しかし，ベリリウム7の 99%近くは，電子を捕獲してニュートリノを放出し，リシウム7に転換する．この反応過程では，2個の粒子，つまりリシウムとニュートリノが反応のエネルギーを分かち合うため，ニュートリノのエネルギーは連続分布（227 ページの図参照）ではなく，一定の値を持つ．このエネルギー値は 0.86 MeV である．こんなにエネルギーが少ないと，水チェレンコフ検出器では検出が不可能であり，塩素実験でも検出効率は低い．しかし，インジウム検出器なら十分な検出数が見込まれる．ブースのインジウム・アンチモン検出器は，熱運動のためのエネルギーの幅も測定することができるので太陽標準理論の仮定がどうであっても，太陽心臓部の温度を直接，測定する手段を与えてくれる．何はともあれ，将来実現が予想されるインジウム太陽ニュートリノ検出器[注8]は，どうやら私たちに，もっとも身近な星である太陽に関する貴重な情報を提供してくれそう

注8　インジウム太陽ニュートリノ検出器は，2006 年の時点で実現されていない．

である[注9].

[注9] 太陽ニュートリノ問題の解決：SNO 実験によって実証された太陽ニュートリノ（電子・ニュートリノ）の種類の転換は，有限質量を持つニュートリノによって引き起こされるニュートリノ振動に起因する場合と，太陽磁場や未知の素粒子反応による可能性が考えられた．しかし，2002 年 12 月にカミオカンデ（1997 年まで稼働）の跡地に建設された，1000 トン液体シンチレータ検出器カムランドは原子炉ニュートリノ（反電子・ニュートリノ）振動現象を発見し，太陽ニュートリノの種類の転換がニュートリノ振動によることを証明した．30 年来の謎であった太陽ニュートリノ問題は解決された．

第7章

宇宙を覗く

1987年2月24日，肉眼ではっきりと見ることができるくらい明るいII型超新星が，私たちのすぐ隣の天体に突如現れた．この知らせが世界を駆けめぐった時，天文学者たちの喜びと驚きは想像を超えるものであった．[1]

スタン・ウーズレイ，マーク・フィリップス，1988年5月

1000万年ほど前，小さな天体の中の高温で活発に動き回るガスから一つの星が生まれた．その星は誕生した時から子供であるにもかかわらず，太陽よりも巨大であったため，壮絶な爆発によって死を迎えることが運命づけられていた．一瞬のまばたきの間に爆発を起こした星，超新星は，太陽が100億年の生涯をかけて作り出すエネルギーの100倍に匹敵するエネルギーを放出した．そして17万年後にそのエネルギーのごく一部分が，地球上の地下深くに設置してあった2つの大型水タンクに吸収された．

1987年2月23日にこのエネルギーを検出したことは，星の死を暴露することになったとともに，ここ地球上で，天文学観測の新しい分野の誕生を歴史に刻んだ．… ニュートリノ天文学の創始である．初めて実験によって，私たちの銀河の外からやってくるニュートリノが検出された．

ニュートリノの一群が地球を貫通してから3時間ほどして，超新星から放たれた可視光線が地球に到着し始めた．この光はほぼ1日後，チリにあるラス・カンパナス天文台の天文学者，イアン・シェルトンによって最初に発見された．彼は，私たちの天の川銀河を周回する2つの小さな天体の一つ，大

マゼラン雲の写真を撮っていた．シェルトンは，変光星や新星など，突然輝きだす微弱な星を系統的に探索する計画を立てていた．観測を始めて3日目にあたる夜の2月24日に，彼は幸運を射止めた．写真乾板の改良のために，25 cm 反射望遠鏡で3時間かけて露光を行っていたとき，彼は新しい星に気がついた．シェルトンの同僚のロバート・ジェデュレジュウスキーは次のように話した．

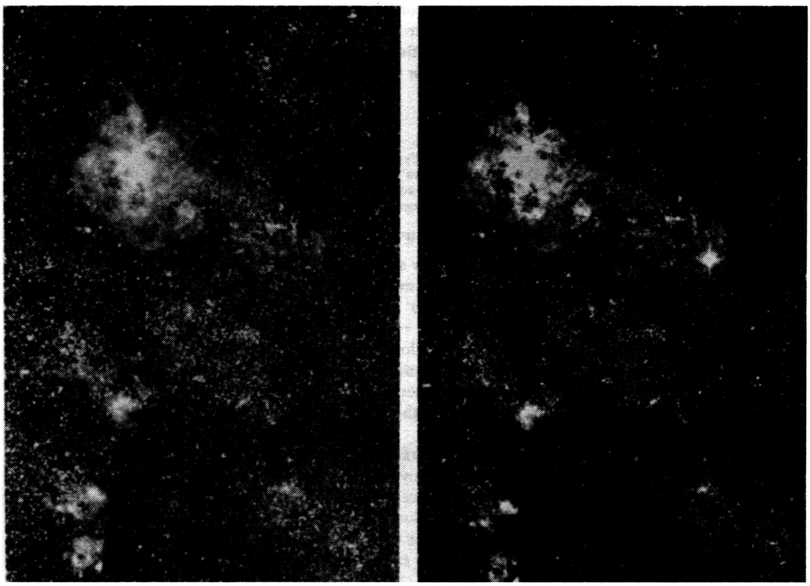
彼は制御室に入って来るや，“大マゼラン雲で新星が見える明るさは何等級か” と尋ねた．私たちは約8等級と判断した．

次にイアンは，もし昨晩，写真乾板上で12等級弱であった星が見かけ上5等級になったなら，この星を同一のものとみなすべきかどうかについて質問した．バリー・マドーレは，それは超新星に違いないと答えた．この時，オスカー・デュハルドが議論に割り込んできて，夕刻前にその星を肉眼で見たことを告げた．それから，私たちはみんなで自分の目で確かめるために，ドームの外に歩いて出た．その夜は今までにないくらい澄んでいた．この新しい星はすぐに見つかった．[2]

夜間の観測協力者のデュハルドは，空を見に数時間前に外に出たときすでにこの星に気づいていたのだが，どういうわけか観測者にそのことを報告しなかった．彼にはしばらくの間，重労働を課せなければならない[3] とジェデレジュウスキーは後で注意したという．

発見はすぐに確認された．シェルトンの露光観測は，超新星が2月24日4時20分（世界標準時）に出現したこと示していた．ニュージーランドでは昨晩，アマチュアの天文家のアルバート・ジョーンズが，彼の小さな望遠鏡を用いて天空の同じ部分を観測していた．そして，なにも変わったことに気づかなかった．しかし，2月24日の夜，再び空をのぞくと毒蜘蛛星雲の近くに推測で（5–7）等級の新しい星が見つかった．ジョーンズは，シェルトンの写真乾板による超新星の発見から4時間以内に，独立に超新星を発見した．

かくして，アマチュアとプロの双方の天文家が，20世紀のもっとも意義ある天文学上の出来事の一つ，超新星1987A（1987年の最初の超新星．約400年の間で，肉眼ではっきりと観測できた最初の超新星）の幕開けを目撃した．



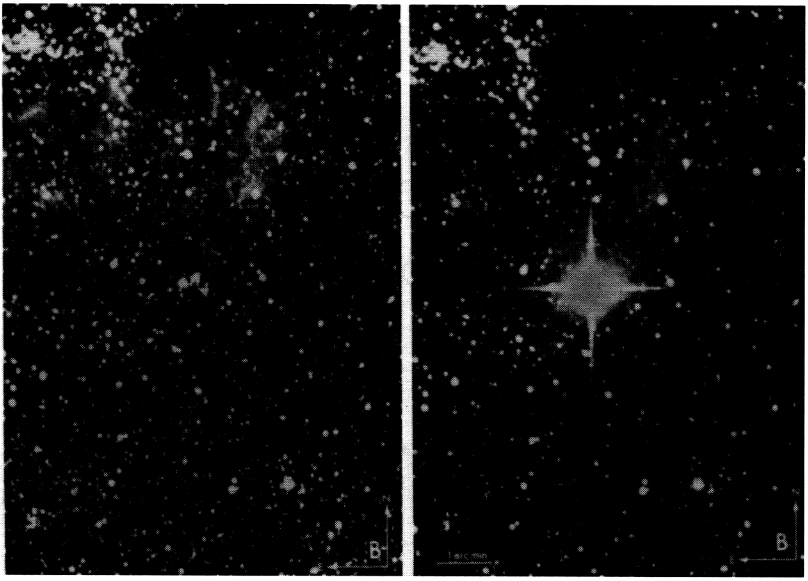
1987 年 2 月 23 日に，大マゼラン雲の端にある毒蜘蛛星雲の中に突如として現れた超新星 SN1987A．2 枚の写真は，爆発前（左）と爆発 4 日後の 2 月 27 日に撮影したものである．水素原子が放つ光によって赤く輝く超新星が，毒蜘蛛星雲の右下にはっきりと見える．(ヨーロッパ南天文台の好意による)

一生涯の出来事

重い星の崩壊や爆発は，自然が奏でる壮大な光景の一つである．その光り輝く迫力は，なにものも及ぶものはない．超新星が誕生して最初の 10 秒間に・・・直径 20 マイルの星の中心部分は，他の全天に輝く星や銀河が放出するエネルギーに匹敵する量のエネルギーを，四方八方にばらまく．・・・それは天文学者の雄大なロマンを，さらにかき立てるような出来事である．[4]

スタン・ウーズレイ，トム・ウィーバー，1989 年 8 月

天文学者はすぐに，新しい超新星の位置を正確に測定した．そして天空図の中から，これまでそこにあった星がなんであるか調べた．望遠鏡が発明されて以来，もっとも明るい超新星爆発を提供した星は，サンドゥーリアク・−69°202 に間違いなかった．この名前は天空の位置と，1969 年に星のカタログを作ったニコラス・サンドゥーリアクにちなんで名付けられた．この星



爆発を起こしたSN1987Aの星は，すぐに青色超巨星のサンドゥーリアク・−69°202と同定された．左の写真の中央近くにある2つ並んだ明るい星の左側の星がそれである．右の写真は，出現してから3日後の2月26日に撮影した超新星．（十字状の輝きは，望遠鏡のせいでできたもの）両方の写真とも青色露光によって撮影したもので，超新星爆発の前の写真は60分，爆発後はわずか15分で撮った．（ヨーロッパ南天文台の好意による）

は“青色超巨星”と呼ばれる星であった．その質量は太陽の約20倍，半径は50倍，また表面の温度は青色から推定して約12000度で黄色に輝く太陽の表面温度の2倍であった．

星の身元確認は，多くの天文学者にとっていささか驚きであった．彼らはすぐにSN1987AをII型超新星，つまり水素の存在を裏付ける光の放出を伴う超新星（I型超新星には水素の証拠がない）であると同定した．過去の超新星鑑定は，II型超新星がいつも赤色超巨星から生まれることを示していた．星の進化の標準理論によれば，このような重い星が中心核の燃料を使い果たすと中心核で重力崩壊が起こり，これが星の外層部を吹き飛ばす衝撃波を発生する引き金となる．しかし，青色超巨星がII型超新星にたどり着くという観測的証拠はなかった．一方，数人の人たちが数値シミュレーションでこの

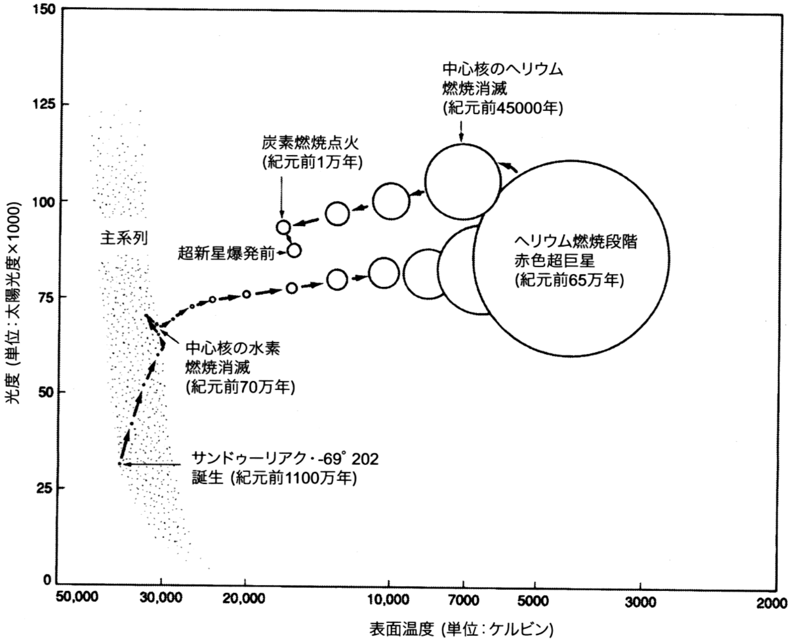
ようなことが起こる可能性を指摘した．サンドゥーリアク・−69°202 は最初の名誉ある観測例を提供した．

過去 20 年に渡って多くの超新星の専門家，特にカリフォルニアにあるリバモア研究所のトム・ウィーバーや，カリフォルニア大学サンタクルツ校のスタン・ウーズレイ，アリゾナ大学のデヴィド・アーネット，東京大学の野本憲一らは，重い星の内部で起こっている現象を計算機内で再現するシミュレーション・モデルを開発した．シミュレーションの結果は，重い星が進化すると内部は巨大タマネギのようなものになるという．

サンドゥーリアク・−69°202 を例にとって見よう．SN1987A で観測された光度の上昇とその後の減衰をよく再現する理論モデルを作ったウィーバーとウーズレイによれば，超新星となった星は約 1100 万年前に大マゼラン雲の中にある明るく蜘蛛の形をした高温で，閃光を放つガスの領域，つまり，毒蜘蛛星雲で誕生した．太陽と同じくサンドゥーリアク・−69°202 は，水素ガスを主成分とする星の一生の第一歩を踏み出した．そして，初めのうちは水素を燃やしてヘリウムを生成することによってエネルギーを得た．この方法で作られる原子核エネルギーは，重力によって収縮しようとする働きを押し止める．この星の中心核にある全ての水素が完全にヘリウムに転換されるまでの 1000 万年の間，この状態が続いた．

原子核エネルギーが一時的に枯渇すると中心核は収縮し，温度が上昇する．その結果，星の外層は膨らむ．5 万年ほど時がたつと，中心核は再び核融合反応を点火するに十分な高温・高密度になった．今度はヘリウム原子核が融合して，炭素や酸素を作る核融合反応である．一方，中心核を取巻く層の水素はヘリウムを作り続ける．そうこうする間に，この星の半径は約 400 万 km から，太陽の半径の 500 倍以上に相当する 3 億 km まで膨れ上がった．サンドゥーリアク・−69°202 は，今，膨張によって表面温度が下がった赤色超巨星になった．

それから約 100 万年の間，星の中心核にあるヘリウムは，燃え尽きて再び重力収縮が起こるまで，燃焼を続けた．そして，次の重力収縮によって中心核が十分な高温・高密度状態になると，ヘリウムから作られた炭素がネオンやナトリウム，マグネシウムの原子核を生成する燃焼過程が進行する．今や星の内部はタマネギのように，皮が幾重にも積み重なった状態になった．す



スタン・ウーズレイと彼の共同研究者が提案した理論モデルによれば，サンドゥーリアク・−69°202 は，紀元前 1100 万年に太陽の 18 倍の質量の星として誕生したことになる．このもって生まれた質量は星の一生を運命づける．星の表面温度と光度の関係を表すこの図の中に，超新星爆発直前までの星の進化段階が図示されている．中心部で水素がすべて燃え尽きた星は，温度を下げるために外層部を膨らませ，図中の右端にある赤色超巨星になるまで膨張を続ける．この段階になると，星の中心核を形成するヘリウムが燃焼して炭素を作る核融合反応が点火する．そして，中心部にあるヘリウムが消費されるまでに星の外層部は収縮に転じ，より小さく，より高温の青色超巨星へと変化していく．(図はトム・ウィーバー，スタン・ウーズレイ，ジョン・マデュエル（ローレンス・リバモア研究所）の好意による）

なわち，炭素の中心核とそれを取巻くヘリウム層，さらに全体を包む水素の層の多層構造である．この段階までくると，星は巨大な量を占める水素の大半を消費した．そして，最外層に残った水素ガスは，4 万年後にこの星の超新星爆発によって生じた紫外線の閃光を浴びてイオン化され，検出されることになる．さらに，星の中心温度はこの時点で，外層を支えるほど十分に高い状態を保てなくなった．このため，星は再び収縮を開始した．そして，星は小さくなりながら赤色から青色に変わり，青色超巨星になった．

サンドゥーリアク・−69°202 は今，破滅に行き着くジェットコスターに乗っていた．炭素の燃焼は僅か 12000 年で終わり，ネオンの燃焼や酸素の燃焼がこれに続いたが，ともに数年と持たなかった．このような急激な変化をもたらす原因は，驚くことにニュートリノとかかわりがある．炭素が燃焼している時期に中心核の温度が 5 億度に達すると，放出される光は電子と陽電子対を生成するのに必要なエネルギーを持つようになる．これらの粒子・反粒子対の大方は，再び対消滅して光子(ガンマー線)に戻る．しかし，まれにニュートリノ・反ニュートリノ対を生成する．反応能力が弱いニュートリノや反ニュートリノは，容易に星の中心核から抜け出し，さらに星そのものから脱出する．この時，ニュートリノや反ニュートリノは重力崩壊を阻止する源になっていたエネルギーを持ち出すことになる．ウーズレイとウィーバーの言葉を借りれば，

星の進化の段階が後半に入り中心核の温度が上昇すると，生成されるニュートリノの数は指数関数的に増大する．そして，星の破滅を招くエネルギー流出の担い手となり，星の死期をせきたてる.[5]

最終的に中心核では，酸素が燃焼してできたシリコンや硫黄が燃えて鉄が生成される．この間，わずか一週間ほどである．その後，サンドゥーリアク・−69°202 は，重力崩壊と鉢合わせの状態になった．鉄の原子核はそれ自身で核融合反応によってエネルギーを生み出すことはできない．すなわち，鉄の融合反応はエネルギーを消費する反応である．そのため，星の中心にある燃焼炉は火が途絶える一方であって，もはや重力崩壊の襲来をくい止めるなんの手段もなくなってしまった．ひとたび，鉄の中心核の直径が地球の半分くらいになり，太陽質量の 1.4 倍の臨界質量に達すると星の運命は定まってしまう．

この高密度の鉄のボールは，数十秒以内に直径わずか 50 km の塊に収縮する．これが重力崩壊である．星の中心核の物質は急に足場を失い，中心点を目指して落下する．この時の落下速度は光速の 1/4 にまで達する．急降下する物質が降り積もった中心は凝縮し，その密度が原子核の物質密度を越えると凝縮は停止する．このことは，陽子や中性子の核子間に働く核力が，これ以上に核子が接近することを妨げるからである．つまり，中心部の物質の収縮

は急停止せざるをえない．しかし，それだけではない．このガチガチの核子物質の塊が中心部に出現したことによって，さらに落下してくる中心核の物質はこの塊と正面衝突を起こし，すさまじい勢いで跳ね返される．その結果，中心核を取り巻く外層物質をはねのけて猛進する巨大な衝撃波が発生する．

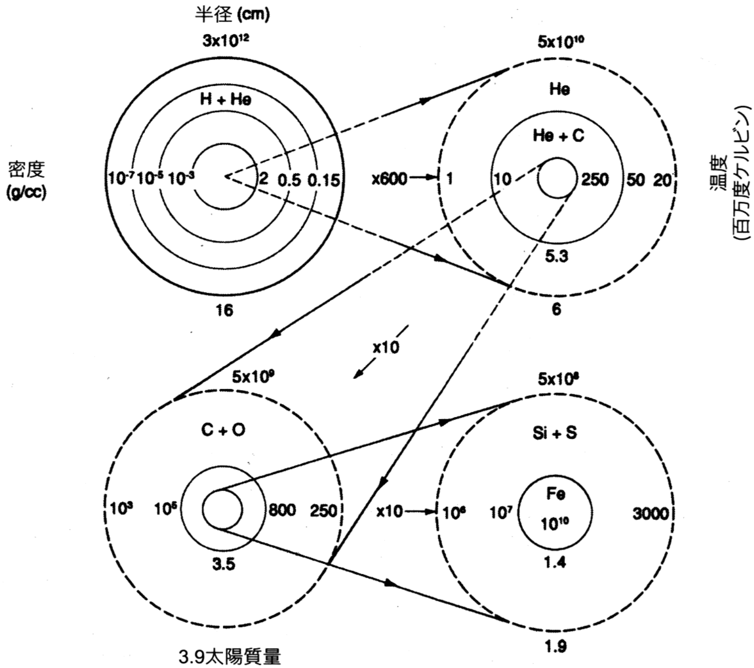
すべてが一瞬のうちに起こってしまうということは，驚き以外のなにものでもない．アリゾナ大学の理論天体物理学者のアダム・バロウズは次のように書いている：

> この星は1000万年もの間，光り輝いてきたが，その重力崩壊は1秒で終わってしまう．さらに，1日以内にこの星の全体は，散りぢりになる．[6]

ニュートリノとニュートリノ生成に働く弱い力は，星を突然の死に追い込む際に決定的な役割を演じる．理論モデルによると，この2つの要素は，引き続き起こる星の爆発を左右する鍵を握るという．まったく不思議なことが起こる．ニュートリノはSN1987Aの出現をほとんど阻止してしまうかにみえる反面，その後，再び出現をよみがえらせる．

衝撃波が中心核の外層部を通過する間に，持っているエネルギーの一部を消費する．これは，中心核からたちどころに逃げ出すことができるニュートリノや反ニュートリノを生成するためである．そして，衝撃波が中心核の外層部の端に達するころには，エネルギーの大部分は運び屋ニュートリノによって持ち出され，ほとんど失速してしまう．

しかしながら，中心核の内層部はいまだに非常な高温状態であるため，高エネルギーのガンマー線が生成される．今度は，このガンマー線が大量のニュートリノ・反ニュートリノ対を作り出す．中心核の密度は十分高く，ニュートリノが拡散によってしみ出てくるのに数秒もかかるほどである．これは，密度が低い時に比べて数千倍も長い時間である．ニュートリノと物質との間の相互作用は，SN1987Aの出現にまさに必要とされていたものと言える．リバモア研究所のジェイムス・ウィルソンとロン・メイルの計算結果は，もし，これらのニュートリノの数%でも，立ち往生している衝撃波に背後から接近して持っているエネルギーを転嫁することができるなら，これは衝撃を復活されるに十分であることを示す．そして，SN1987Aの華々しい花火ショーが始まるのである．



重力崩壊寸前のサンドゥーリアク・−69°202 は，同心球の多重層に異なった元素がひしめく，巨大なタマネギに似た星となった．この図は，スタン・ウーズレイと彼の共同研究者が，計算によって求めた星の内部構造を示す．それぞれの図の中心部分は，600 倍，10 倍，10 倍に拡大して表示されている．図示されている領域の半径は図の上部に cm 単位の，質量は下部に太陽質量に換算した数値が書いてある．各図の中心核の左側に並ぶ数字は，各層の密度を g/cm^3 単位で示したものであり，右側の数字は百万度ケルビンを単位とする温度を与える．H（水素），He（ヘリウム），C（炭素），O（酸素），Si（シリコン），S（イオウ），Fe（鉄）．

超新星 SN1987A を研究する場に遭遇して，天文学者は現代の最新技術の性能を確かめる初めての機会を得た．ウーズレイとウィーバーによれば，

> 我々や数百人もの理論研究者と実験者は，天の恵みの一大イベントを正確に記録し，理解するために，いろんな波長領域での観測の協力体制を組んだ．これは，他に類をみない興奮を呼び起こし，科学上の共同作業を享受し，新しい知識を確立するなど，まさに一生涯の出来事であった．[7]

その興奮を分かち合ったのは，単に天文学者や天体物理学者だけではな

かった.

最初の使者

大マゼラン雲に出現した超新星からの最初の吉報は，10秒間の瞬時ではあったが，星の中心核から飛び出したおびただしい量のニュートリノの群団を，見事に検出したことによってもたらされた．我々は，大量の物質で覆われた超新星の内部を素通しして，初めて星の崩壊に伴う壮絶な激変をかいま見た．[8]

アダム・バロウズ，1988

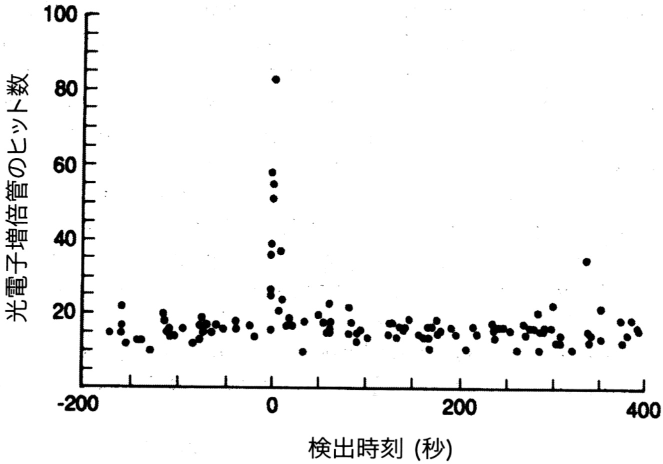
チャドウィックの中性子発見から数ヶ月たった1932年の昔，ロシアの物理学者レフ・ランダウは中性子星の存在を予言した．この星の内部の物質は，極度に圧縮されていて高密度になっているため，陽子と電子は結合して中性子を形成するのである．それから2年もたたないうちに，カリフォルニア工科大学のウォルター・バーデとフリッツ・ツッビキーは，中性子星と超新星との係わりを調べた．そして，彼らは，超新星爆発に伴う莫大なエネルギーが，変哲もない星の崩壊から中性子星を生み出す原動力になると考えた．星が崩壊すると，どの星の中心核も太陽の1.5倍に相当する質量が，直径わずか（10 − 20）kmにまで圧縮され，超高密度の物体となる．星の中心核がこのようになるためには，いわゆる重力結合エネルギーと呼ばれている，想像を絶する量のエネルギーを消費しなければならない．この量を計算することは比較的簡単で，$(2\text{-}3)\times10^{53}$ エルグとなる．身近な量にたとえると，このエネルギーは，太陽が予想される百億年の一生の間に生産する総エネルギーの100倍に相当する．この星の崩壊によって生じるエネルギーの99%は，閃光をともなう華々しい光のショーとしではなく，宇宙空間の四方八方に流出するニュートリノによって持ち出されることを，私たちは知っている．光のショーで費やされるエネルギーは1%以下である．

超新星爆発の源であるSN1987Aから17万光年離れた小さな惑星，すなわち地球上にやってきたニュートリノの一群は，まばらであったとはいえ，それでも $1\mathrm{cm}^2$ 当り500億個という並外れた数であった．このうちの大部分のニュートリノは，私たちがそこに居ることを知るすべもなく，素通りして駆け抜けて行った．このことは私たちにとっても同じで，ニュートリノの通過

に気付かなかった．このニュートリノの一群は，地球の南半球より進入して，地球内部を駆け抜け，北半球から飛び出て行った．もちろん，これらのニュートリノの中には，地球を素通りする旅をまっとうできないものもある．私たちが知っている限りでは，約20個のニュートリノが北半球から抜け出る直前に捕らえられた．日本と北アメリカの地下観測施設で稼働していた検出器が，ニュートリノの脱出を阻止したのである．

新しい超新星出現の知らせが伝わるやいなや，世界中の天文物理学者と素粒子物理学者は，この地球上で検出されたニュートリノがもたらす新しい知見がなんであるかを，いっせいに考え始めた．封筒やビールの紙コースターのうら面を使って計算したり，もっと詳細な解析を行なうために計算機を用いたり，まさに計算の衝撃のうねりが一瞬にして世界を駆けめぐった．最初に口火を切ったのは，バコールと彼の共同研究者であった．彼らの論文が雑誌“ネイチャー”に受理されたのは，超新星爆発に伴うニュートリノ検出の知らせが届いてから，わずか3日後の3月2日であった．彼らは，稼働中の実験装置において予測されるニュートリノの検出数を計算した．ホームステーク鉱山にあるデービスの太陽ニュートリノ検出器（第6章参照）は，おそらく1個のアルゴン原子を余分に作る程度で，このため，1日（1～2）個の割合で生成される太陽ニュートリノによるアルゴンと見分けがつかないだろう．しかし，バコールの計算は，日本のカミオカンデII検出器（第6章参照）が絶好の機会に恵まれたことを示唆した．50個ほどのニュートリノの検出が見込まれるという．これらのニュートリノは，超新星が重力崩壊を開始して大量のニュートリノを放出するまでに要する，数秒の時間幅の間に検出される．このような短時間に近接して多くの粒子が一度に検出される現象は，通常のバックグランド現象と異なり，一目瞭然であろう．

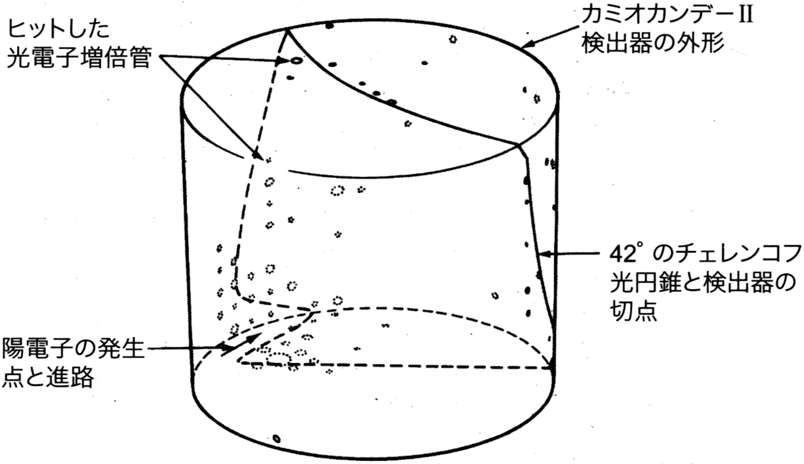
ニュートリノの一群を探すお目当ての時刻は，光学観測よって最初に超新星爆発が発見された時刻より少し前であった．超新星出現を知らせた光のショーが起こる前に，星の中心核から抜け出たニュートリノは，重力崩壊によって発生した衝撃波よりも早く星の外層部へと突き進む．このため，衝撃波が外層部に到着して爆発によって輝きだす光のショーの露払い役を演じるであろう．カミオカンデ実験チームは，2月末から以前にさかのぼってデータを調べた．そして，ニュートリノの一団を発見した．2月23日7時35分（世界



1987年2月23日にカミオカンデIIが検出した事象の時刻と，事象に伴う光を感知した光電子増倍管の数（ヒット数）の分布．この分布図の時刻0（世界標準時の7時35分）で，ほぼ同じ割合で検出されるバックグランド事象をしのぐ，劇的なヒット数の突出が見られる．このことは明らかに，時刻0の検出器内で，なにか異常なことが起こったことを告げるものであり，SN1987Aと関連する現象が，バックグランド現象の統計的変動では説明できないことを示す．

標準時）に，ニュートリノ反応とみなすことができる11事象が記録されていた．これらの事象は全て13秒間に集中していた．そして，その中の初めから9事象は，2秒以内に検出された．この時刻は，イアン・シェルトンによって最初に超新星爆発が観測された時刻の約18時間前であった．カミオカンデ・チームは幸運であったといえる．それは，ニュートリノ検出の時刻が，定常的に繰り返して行なわれる検出器の性能検査のためのデータ収集終了から，わずか数分後であったからである．この性能検査作業の間，検出器はニュートリノ反応に対して感応せず，データを記録することができない．

もう一つの地下観測装置を持つチームも，SN1987Aからのニュートリノ検出する可能性があることを知っていた．彼らはカミオカンデの発見の知らせを聞いて，いつの日のデータを調べればよいかがわかった．これがIMB実験グループである．IMBとは，最初に実験に参加したカリフォルニア大学アーバイン校（I），ミシガン大学（M），ブルックヘーブン国立研究所（B）



図中の小さな円は，カミオカンデIIで検出されたSN1987Aに伴うニュートリノ群の中のもっともエネルギーの高い事象に対して，光感知した光電子増倍管群を表す．それぞれの円の面積は，光電子増倍管がその位置で受光した光量の大きさに比例する．矢印は，水中でニュートリノと陽子との反応によって作られた陽電子の生成場所と，運動方向を示す．また，陽電子の発したチェレンコフ光円錐と，検出器の壁との交点を連ねた曲線が図示してある．(点線は検出器の裏面を表す.)（M. 小柴，カミオカンデIIの好意による)

の研究機関名にちなんでつけられた名前である．このチームには，前の章で紹介した，モーリス・ゴールドハーバーとフレッド・ライネスがいる．

約8000トンの超純水を蓄えた検出器は，オハイオ州フェアポートの近郊にあるモートン・ティコール岩塩鉱の地下600mの空洞に設置されている．カミオカンデと同じく，この検出器の目的は陽子崩壊を探すことであった．直径20cmの光センサー（光電子増倍管）が，立方体の形状をした検出器の6面の全内壁に1m間隔で並べてある．このセンサーは，水中で荷電粒子が光よりも速く走る時に生じるチェレンコフ光を検知する[注1]．この光は，荷電粒子の進行方向を軸とする円錐形の側面に沿って伝播し，検出器の壁面に到達するとリング内にある光電子増倍管をたたき起こす（218ページの図を参照）．

注1 物質中の光の速さは，真空中の光速／屈折率（水＝1.33）となる．このため物質中では，粒子は光よりも速く走ることが可能になる．

陽子崩壊を探す目的からすれば，ニュートリノ反応は不必要なバックグランド現象とみなされる．IMB検出器では，2日に1個の頻度で陽子崩壊と見誤りやすいニュートリノ反応が検出される．しかし，IMBチームは1980年代の前半に，超新星爆発に伴うニュートリノの検出効率を向上させるために，検出器の改良を行った．当時彼らは，我々の銀河中心で超新星爆発が起こることを想定して，検出器の応答がいかなるものかを考察した．それによれば，これほど近い所で超新星爆発が起こると，検出器は大量のニュートリノのシャワーを浴び，ニュートリノ反応によって発生するチェレンコフ光は幾重にも重なり合う．このため，それぞれ個々のリングを分離することは不可能になる．そして，全ての光電子増倍管から一瞬の間に信号が送られてきて，データの洪水に見舞われるだろうと考えた．(チームのメンバーの一人，ジョン・ロセコは，このことを論文にしてネイチャー誌に投稿したが，ネイチャー誌の編集者はたいした印象を受けなかった．そのため，論文掲載許可がでるまでに，14ヶ月もかかった！)

しかし，サンドゥーリアク −69°202の爆発を観測する機会にめぐり合えたことは，事態を変えた．すなわち，この超新星爆発の位置は，検出器がパンクするほど多くの反応を引き起こすような近距離ではなく，かといって反応数が少ないために信頼性が疑われるほど遠方でもなかった．正確には，7時35分41秒37（世界標準時）からの6秒間に，最初の8個のニュートリノの群がIMB検出器の光電子増倍管を光らせた．さらに7個が次の6秒間に検出器内で反応を起こしたようだが，残念なことに数時間前に停電があり，光電子増倍管の4分の1が作動しなくなっていたため定かではない．この停電がなければ，IMBはもっと多くのニュートリノを検出していたであろう．しかし，実際のところ，偶発的におこるバクグランド現象の割合が無視できることと，かけ離れた大陸にある2つの実験装置が同時にニュートリノの到来を観測したという事実は，カミオカンデとIMBの結果が超新星爆発によるものであるとする，十分な証拠となった．

カミオカンデ・チームによる“SN1987Aからのニュートリノ・バースト観測”と題する論文が，“フィジカル・レビュー・レター”誌の事務局に届いたのは3月10日であった．それは，IMBチームの論文の3日前であった．そして，2つの論文は，超新星爆発に伴うニュートリノが検出されてから6週

間たった，4 月 6 日に一緒に掲載された．

我々の検出した現象と超新星 SN1987A の光学観測の時間が近接していることは，ニュートリノが超新星の重力崩壊にかかわっているという，疑問をはさむ余地のない証拠である．[9]

これが，IMB チームの結論であった．カミオカンデ・チームはさらに踏み込んで：

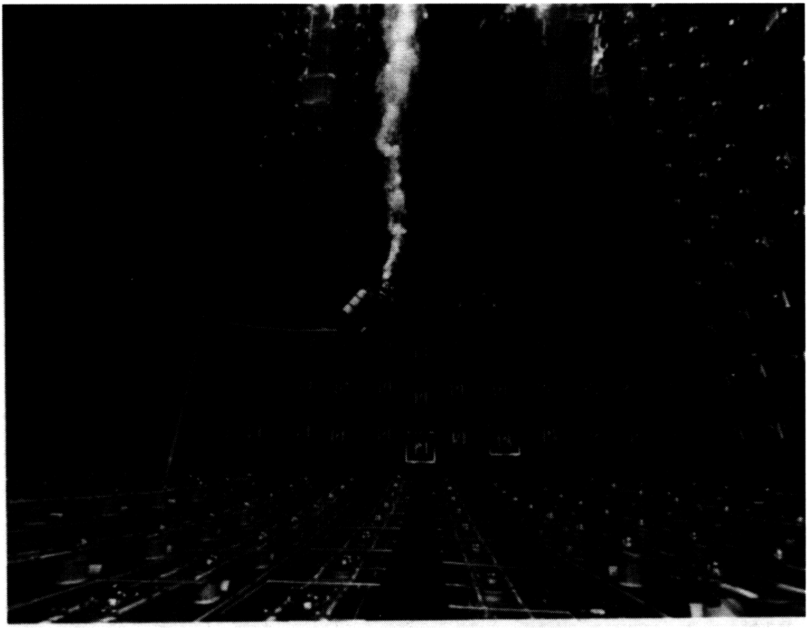
この結果は … ニュートリノ天文学の最初の直接観測であり，超新星の重力崩壊と中性子星の形成に関する最新の理論と驚くほどよく一致する．[10]

さらに，スタン・ウーズレイとトム・ウィーバーは，のちに次のように書いている：

ニュートリノ検出が理論的研究に与えた意義は大きかった．… 短い時間間隔の中でニュートリノ・バーストが検出されたことは，理論上の予測どおり，中性子星がタイプ II 型の超新星から形成されたことを示すものである．[11]

大質量の星の中心核が重力崩壊を起こして中性子星ができる時，陽子が電子と結合して中性子になる反応（逆ベータ崩壊）によって，ほぼ 10^{57} 個の電子・ニュートリノが作られる．この電子・ニュートリノは，平均すると 10 MeV のエネルギーを持って飛び出る．平均エネルギーは中心核の温度と密度を決めれば，星の崩壊の計算機シミュレーションによって求めることができる．そして，これらの電子・ニュートリノが崩壊する星から持ち出す全エネルギーは，1.3×10^{52} エルグに相当する．しかし，これは崩壊によって解放される全エネルギーのわずか 12 分の 1 にすぎない．

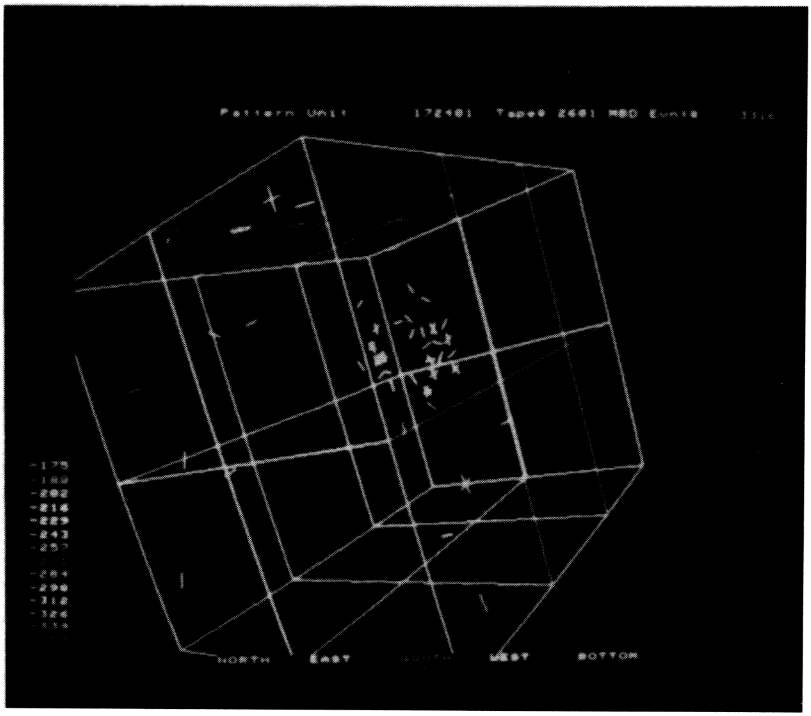
さらに次の段階で．崩壊を起こしている星の高温物質の中から，星の劇的な死を引き起こす原動力となるニュートリノ・反ニュートリノ対が生成される．1970 年の初めまで知られていなかった中性カレント相互作用（すなわち，中性 Z^0 粒子を交換する相互作用：第 5 章参照）は，すべての種類のニュートリノ・反ニュートリノ対生成を引き起こす．つまり，電子・ニュートリノ以外にも，ミュー・ニュートリノやタウ・ニュートリノの対生成が起こる．ここで，電子・ニュートリノと反電子・ニュートリノだけは荷電カレント相互作用によっても作られる．それぞれの種類のニュートリノや反ニュートリノ



水で満たされた IMB 検出器の内部．この装置は，オハイオ州クリーブランド近郊にあるモートン・ティコール岩塩鉱の地下 600m に作られた．等間隔の格子状に配置された 2048 本の光電子増倍管が水中を監視する．それぞれの光電子増倍管には，直接，光電子増倍管に届かない光も集光できるように設計された，4 角形のプラスチック板が取付けられている．写真中のダイバーは，検出器の月例点検を行なっている．検出器の対面する壁との間の距離は 20m もあるが，内部を満たす純水は極めて透明であることがわかる．(IMB の好意による)

が持ち出すエネルギーは，多少の違いがあるにせよほぼ等しい．

カミオカンデと IMB 検出器は，これらのシナリオが正しいかどうかを判定する最初の試金石を提供した．双方の検出器は，水の中の電子とニュートリノとの散乱をとおして，すべての種類のニュートリノを検出できる．この反応で電子はニュートリノから反銚を受けて，ニュートリノの進行方向とほぼ同じ方向に走り出す．そして，検出器の壁面にチェレンコフ環を映し出す．また，反電子・ニュートリノは陽子とも反応し，陽電子と中性子になる．この反応は，ニュートリノ・電子散乱よりずっと頻繁に起こる．実は，コーワンとライネスが 1950 年代に，ニュートリノの発見に用いた反応がこれであ



この計算機による空間構成図は，SN1987A からやってきたニュートリノの 1 つが，IMB 検出器の中で反応を起こして生じたチェレンコフ環を表す．長い直線は検出器の壁面の輪郭である．短い線と十字記号は光を感知した光電子増倍管の位置を示し，線の本数は受光量に比例して描かれている．(IMB の好意による)

る（第 2 章参照）．この反応において，陽電子はチェレンコフ光を発するものの，走る方向とニュートリノの進行方向との相関はない．

カミオカンデの最終解析結果を見ると，検出された粒子の中の 2 つの進行方向は，逆にたどれば大マゼラン雲の方向と一致していた．ということは，ニュートリノと電子の弾性散乱によるものと考えられる．一方，大部分の反応は予想どおり，陽子による反電子・ニュートリノ捕獲反応であろう．このことから，反電子・ニュートリノの検出個数とその平均エネルギー（反跳陽電子が放出するチェレンコフ光量から計算される）を用いて，超新星の中心核の温度と，すべてのニュートリノと反ニュートリノが超新星から持ち出し

たエネルギーが計算できる.

得られた答えは，星の崩壊についての私たちの理解が基本的に正しいことを示す劇的な証拠となった．マサチューセッツ州タフト大学で開催されたニュートリノ'88 国際会議で，バロウズは次のように話した：

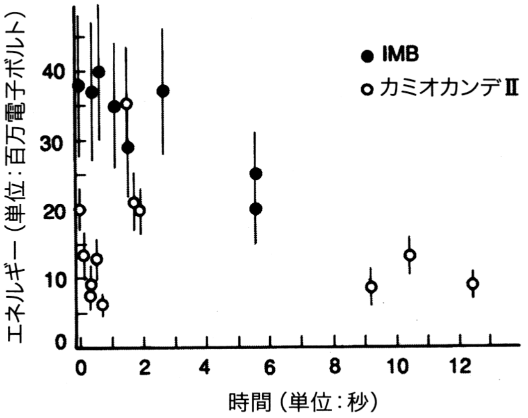
星の重力崩壊は 30 年間も，中性子星は 50 年もの間，理論家だけのどこからも横槍が入らない別天地の中で研究が続けられてきた．理論家が平穏でいることは喜ばしい．… SN1987A からのニュートリノ検出は，星の死，超新星，中性子星の誕生に及ぶ一連の基礎理論に，はじめて決定的な試練を与えた．1987 年 2 月 23.316 日（世界標準時）の約 10 秒間が，これらの理論を天文学に変えてしまった[注2].[12]

検出されたニュートリノのデータから，SN1987A が放出した全エネルギーは，$(2\sim3)\times10^{53}$ エルグになる．この量は，太陽質量の約 1.5 倍の星の中心核が重力崩壊を起こし，中性子星を形成する時に開放される重力結合エネルギーの計算と一致する．さらに，ニュートリノの一群が地球上に降り注いだ時間が数秒間であったことは，計算機シミュレーションで再現されているように，ニュートリノが高密度の星の中心核から比較的ゆっくりと拡散して，そこからにじみ出るメカニズムを確証した．星の崩壊を記述する一連のシナリオの中でまだ検証されずに残っている一つは，停滞した衝撃波の再活性，つまり衝撃波がそのエネルギーを使い果たしてから再びよみがえるメカニズムに関するニュートリノの役割である．

私たちは，これらの疑問について答えを提供してくれる次の超新星の出現を，400 年も待つ必要はないだろう．SN1987A とともにニュートリノ天文学という科学が誕生し，ニュートリノ天文学者は今，超新星ニュートリノ・バーストとはどんなものかを知っている．このことは，光による信号がかすかで弱い場合でも，また例えば，我々の銀河の帯の部分にある塵によって見通しが悪い場合でも，超新星爆発の観測が可能であることを意味する．モスクワの理論・実験物理学研究所のレフ・オクーンは，ニュートリノ'88 国際会議で次のように話した．

SN1987A が私たちに与えた貴重な財産は，壮大な予行演習であった．1987 年 2 月 23

注2　2002 年，カミオカンデ実験チームの代表者である小柴昌俊氏に，「ニュートリノ天文学の創始に関する先駆的業績」によりノーベル物理学賞が授与された．



カミオカンデIIとIMBの双方の検出器で検出されたニュートリノの到着時刻の分布．時刻の原点は，1987年2月23日7時35分40秒（世界標準時）である．この図は，ニュートリノが12秒間，ほぼ一様に連続して到達したことを示している．このことは，ニュートリノが超新星の高密度の中心核から，数秒間にわたって拡散して出てくるという理論モデルに充分な検証を与える．

日以前に比べて，現在，より多くの物理学者が宇宙について考えを巡らせている．次の超新星出現の日時と期待される重要な成果については，私の話の最後に述べます.[13]

オクーンは冗談を言っているのではなかった．彼は真剣であった．

超新星爆発の年を予想することは，巨大加速器や大型検出器の予算が承認される年を予想するよりも難しくはない.[14]

彼の議論の筋道は極めて明快である．過去1000年の間に，わずか6個の超新星が我々の銀河で発見された．そして，これら全ては，銀河中心から離れている太陽系の比較的近い領域で起こっている．しかし，他の銀河系での観測結果から，超新星はほとんど銀河中心付近に集中していることがわかる．しかし，我々の銀河中心は，塵によって視界が閉ざされているまさにその領域である．そして，オクーンは次のように続けた：

…なぜ，私たちの祖先が銀河中心領域で超新星を見つけなかったのかが説明できる…しかし，塵はニュートリノにとってなんら障害にならない．

専門家による最近の計算から，我々の銀河で1世紀に（2〜3）個の超新星爆発が予測される．しかし，ニュートリノ検出器の建設が遅きにしたため，私たちは20世

紀における遭遇の機会を失ったのだろう．楽観的ではあるが，私は次の超新星の時期が，(2003 年 ±15）年と予測する．… 重要なポイントは … マイナス符号である．超新星ニュートリノは私の話が終る前にも，このホールにやって来るかもしれない．そう，私たちは急いで用意をしよう.[15]

オクーンは心配するに及ばなかった．SN1987A に刺激されて，世界中の自称ニュートリノ天文学者達は，1990 年代にすでに新しい検出器の建設に取り掛かっていた．そして，次の世紀に完成する検出器に夢をかけている．願わくは，新しく生まれた科学が円熟期に達するまでに，長い時間を要しないで欲しい．

宇宙起源ニュートリノ

私たちは，いつかは高エネルギー・ニュートリノ天文学が実現されるものと信じている．それは，通常の一次宇宙線と異なり，ニュートリノが発生源から一直線に地球にやってくるからである．このためニュートリノは，可視光や電波によってもたらされるものと全く質の違う，天文学上の情報を運んでくれる.[16]

ケニス・グライセン，1960 年

パウリ仮説の中に登場したニュートリノが，物質と実際に相互作用する粒子であることを，クライド・コーワンとの共同研究で検証したフレッド・ライネスは，それから 10 年後に，南アフリカの金鉱の地下，約 3200m の場所で実験を行なっていた．再び彼はニュートリノを捜していた．しかし，今度は原子炉の中心部で人工的に作られるニュートリノではなく，私たちの太陽系の遥か彼方で作られるエネルギーの高い粒子が，地球の大気と衝突する際に生成する，高エネルギー・ニュートリノの検出が目当てであった．実験装置は 1964 年の秋に稼働を始めた．ライネスと彼の共同研究者である J.P.F. セルスカップは，のちに次のように書いている：

… 1965 年 2 月 23 日，検出器は水平方向から飛来したミューオンを記録した．… 自然界に存在する高エネルギー・ニュートリノが初めて検出された.[17]

私たちが実験室で作ることができるエネルギーをはるかに越える，高エネルギー領域に及ぶエネルギーを持つニュートリノが，私たちの体の中を絶えず

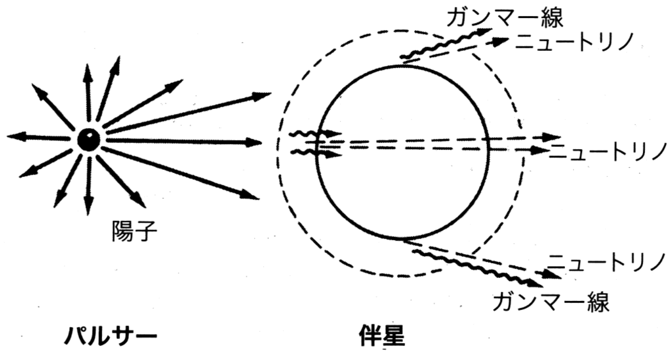
通り抜けている．エネルギーの低いものほど頻度が高い．太陽からやってくるニュートリノは，低エネルギー・ニュートリノの代表であって，最大 14 MeV のエネルギーを持つ．このニュートリノは，他の太陽ニュートリノの生成頻度に比べて，まれにしか起きないボロン 8 の崩壊の際に生まれる．SN1987A から飛来したニュートリノは，II 型超新星に関する理論モデルの予測のとおり，それぞれの種類でほぼ等しい平均エネルギーを持っていた．しかし，ニュートリノの中には 1000 倍以上の大きなエネルギーを持って，地球上に降りそそぐものもある．それらは，電気を帯びた高エネルギー粒子が地球大気の物質や星間物質，または，さらに遠方の天体物質と相互作用する時に生成される．あなたがこのページを読んでいる今も，大気中での原子核反応によって作られた，10^{10} eV（10000 MeV）以上のエネルギーを持つニュートリノが，毎秒 2〜3 個あなたの体の中を通過していく．

地球の大気上空は，陽子を主成分とする高エネルギー宇宙線粒子の絶え間ない襲来を受けている．宇宙線は大気物質中の原子核と衝突すると，荷電パイ中間子や中性パイ中間子を生成する（第 4 章参照）．荷電パイ中間子は，その後，ミューオンとミュー・ニュートリノに崩壊する．さらにこれらのミューオンはしばしば，地上面に到達する前に，電子と電子・ニュートリノとミュー・ニュートリノに崩壊する．このように 2 次的に生成される粒子群，つまり粒子シャワーを生み出す宇宙線の最大エネルギーは，10^{20} eV（1 億 TeV）にも達する．このエネルギーは，現存する人工粒子加速器の最高エネルギーの 1 億倍に匹敵する．

最大エネルギーを持つ宇宙線の頻度は稀である．エネルギーが 10^{16} eV 以上のエネルギーの粒子が，平均的な大きさの部屋の中を横切る頻度は，1 年に 100 回程度である．一方，10^{20} eV 以上のエネルギーの粒子になると，1 平方 km の面積に検出器を敷き詰めても，1 世紀のうちにわずか数回検出されるのみである．これらの超高エネルギー宇宙線は，明らかに高エネルギー・ニュートリノ誕生の源となる．

宇宙線の生成起源はまだ解明されていない[注3]．我々の銀河系外からやってくる荷電粒子は，途中にある銀河磁場の中を通過する際に，ねじれやらせん

注 3 第 1 章の注 3 を参照．



超高エネルギー宇宙線源の候補として，パルサー（高速回転する中性子星）と高密度の中性子星に飲み込まれつつある伴星からなる連星系が考えられる．パルサーが作る強い電磁場で加速された粒子（陽子）は伴星の物質と相互作用し，ニュートリノやガンマー線とともに荷電粒子を生成する．荷電粒子は磁場によって螺旋運動し，空間に放出され宇宙線の仲間入りをする．しかし，ニュートリノやガンマー線は偏向を受けず地球にやってくるため，超高エネルギー宇宙線源の方向に関する情報を提供してくれる．ガンマー線はある確率で途中にある物質に吸収され消滅するけれども，ニュートリノはなんの影響も受けずに地上で検出される．

運動を受け，方向に関する情報を失ってしまう．このため，地球上にはどの方向からもほぼ一様にやってくる．宇宙線は，例えば超新星によって作られるような衝撃波の内で加速されるとする考えがある．しかし，よりもっともらしいアイディアは，宇宙線がパルサーのような特異な天体の周辺でエネルギーを獲得するというものである．ここでパルサーとは，ほとんどがII型超新星の残骸の中心で高速回転する中性子星を示す．

しかし，ガンマー線は磁場の影響を受けない．すなわち，方向性を保持している．このため，宇宙放射線の中で高エネルギー・ガンマー線の数は，荷電粒子の0.1%以下であるにもかかわらず，多くの研究チームは高エネルギー・ガンマー線が大気中の原子核と相互作用して生成する電子や陽電子，およびガンマー線によるシャワー現象を探索する検出器を完成させた．

最近になってこれらの検出器は，エネルギーが 10^{12} eV をはるかに越える超高エネルギー・ガンマー線源を幾つか確認した．低いエネルギーのガンマー線は，電子を加速することによって生じる放射としてうまく説明される．しかし，この放射を伴う電子が超高エネルギー・ガンマー線の発生源とは信じ難

い．よりもっともらしい説は，まず陽子が高エネルギー状態にまで加速される．次に，物質と相互作用してパイ中間子シャワーを作る．このシャワー粒子中の中性パイ中間子は，すぐにガンマー線に崩壊する．この説が正しければ，超高エネルギー・ガンマー線源は，人工加速器とまったく同じ原理で働く宇宙加速器である．この加速器は，陽子やそれほど頻繁ではないが他の原子核を，私たちが近い将来において地上で達成できるエネルギーよりも，もっと高エネルギーにまで粒子を加速することができる．

このような超高エネルギー・ガンマー線の発生源で，中性パイ中間子が生成されるということは，荷電パイ中間子の生成も当然考えられる．そして，荷電パイ中間子がミューオンへ崩壊する時に，ミュー・ニュートリノが生成される．電荷を持っているミューオンは，宇宙空間に存在する磁場によって偏向を強いられるが，ニュートリノはガンマー線と同じく，なんの影響も受けずに地球まで直進してくる．もし，検出器が超高エネルギー・ニュートリノの発生源を突き止めたとしたら，その源は宇宙加速器の存在を示すもっとも確かな証拠になる．ガンマー線の発生源について，幾つかの疑問点が挙げられているが，一方，超高エネルギー・ニュートリノが素粒子や原子核との間の相互作用によって作られることについては，疑いの余地はない．

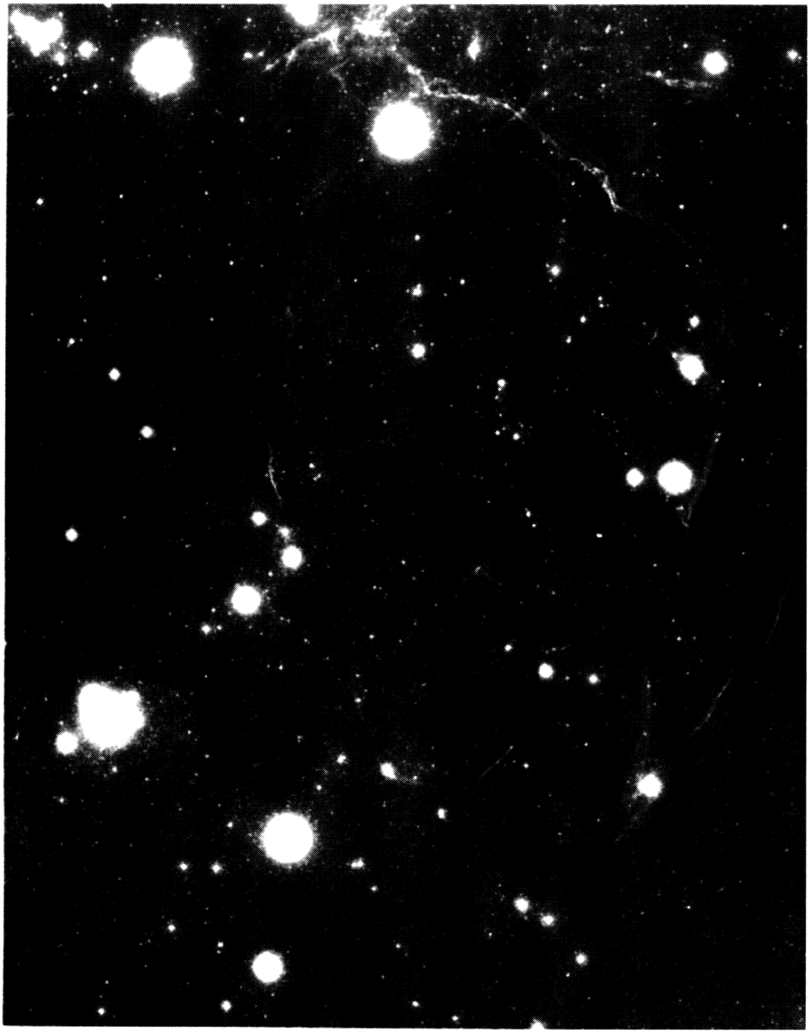
超高エネルギー・ニュートリノ天文学への挑戦は，ライネスのパイオニア的実験後，25 年の歳月を経て，ようやく一歩を踏み出そうとしている．現在，世界中で多くの実験の準備が進められている．また，ほとんど見つけだすことが困難なものを追跡するチャレンジ精神に啓発されて，さらに多くの実験が提案され，また物理学者の胸のうちで具体化されつつある．

ニュートリノ望遠鏡

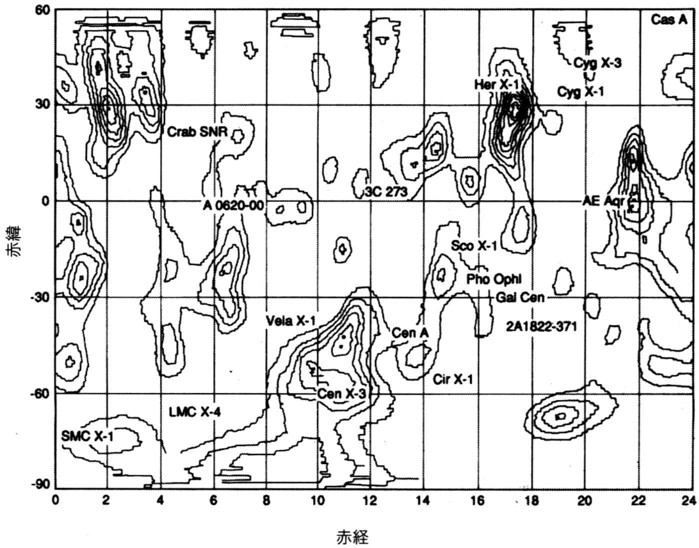
検出器を巨大にしなければならないことは自明である．・・・さらに，ニュートリノ反応を装うバックグランド事象を，年に 1 事象程度まで落とさなければならない．・・・ニュートリノ以外の宇宙放射線の影響を減少させるために，実験装置を地下深くに設置することが必要になる．[18]

ケニス・グライセン，1960 年

1990 年代は，ニュートリノ天文学時代の到来になるだろう．多くの研究



輝くひも状のガスの連なりは，南半球から観測することができるベラ星雲で，11000年前に起こった超新星爆発の残骸の可視部分である．この写真の左手にある残骸の中心部（光を放っていない）には，パルサーが存在する．パルサーは回転する中性子星で，重力崩壊によって爆発した星の核に相当する．そして，パルサーはおそらく，宇宙線にとっての天然の加速器となる．この領域は超高エネルギー・ガンマー線源であることが確認されており，宇宙ニュートリノの放出も期待される．(エジンバラ王立天文台)



このニュートリノ源の天球地図は，IMB 水チェレンコフ検出器で検出された宇宙ニュートリノ候補の方向分布を基に作成された．IMB は宇宙ニュートリノ観測施設として建設されたのではない．しかし，天球分布の数箇所，例えばハーキュリー X-1（Her X-1）の近傍などにニュートリノが集中している兆候を示していることは，より大きな検出器を用いれば，宇宙ニュートリノ初検出にほのかな望みを与える．

チームが，ニュートリノ望遠鏡の研究に携わっている．それらは，ノートに書かれたアイディアの段階のものから，実験のプロポーザルができあがってはいるがまだ予算化されていないもの，さらに，装置が完成して地球外ニュートリノを辛抱強く待ち受けているものまで，いろんな状況にある．これらの望遠鏡の幾つかは第 6 章で述べたように，太陽ニュートリノを検出することに的を絞って設計されている．またあるものは，主に我々の銀河内に出現する超新星爆発に伴うニュートリノの検出を目指して，検出器の性能を最適化している．その他のグループは観測対象をずっと遠方に定めて，超高エネルギー・ニュートリノの起源となる天体の探索を目指す．多分これらの研究は，宇宙線の起源についての謎を解く鍵を提供するだろう．

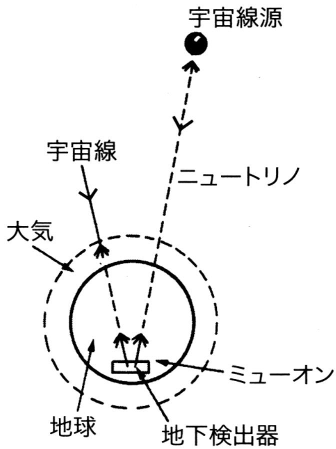
ニュートリノ望遠鏡は，よく見かける光学望遠鏡や電波望遠鏡とは似ても似つかない．まず第一に，ニュートリノ望遠鏡は通常，山頂ではなく山の地下

深くに設置される．このことは，望遠鏡としての検出器に対する宇宙線の襲来を防ぐために必須となる．さもなければ，検出器は招かざる客，バックグランド事象の信号にまみれることになるだろう．もう一つ望遠鏡に要求される性能は，ニュートリノが物質と相互作用する舞台となる大量の物質を，くまなく監視できることである．

低エネルギーの太陽ニュートリノや超新星ニュートリノを検出する時は，検出器自身の内部で生じる相互作用を通してニュートリノを検知する．つまり，望遠鏡は検出器であると同時に，標的でもある．すでに太陽ニュートリノ検出器の例から明らかなように，ニュートリノ相互作用は稀なため，大量の標的物質が必要になる．

しかし，超高エネルギー・ニュートリノを探索する実験では，鍵は別の所にある．これらのニュートリノが到来する頻度は非常に少ない．例えば，10^9 eV以上のエネルギーを持つニュートリノが，地球上に毎秒・1 cm^2 当りにやってくる頻度は，太陽ニュートリノの約2兆分の1である．そこで有意な数のニュートリノ反応を起こすためには，桁外れの標的となる物質量が要求される．確かに，地球それ自身をニュートリノの標的として使用することは，理にかなっている．宇宙ニュートリノの大部分は，たやすく地球を貫通するが，一部は，特にエネルギーの高いニュートリノは，地球内部で反応を起こしてミューオンを生成する．幸いにもこのミューオンは，物質を透過する力が比較的強い．検出器の下方，数十 km 手前の地中で生成されたミューオンは，検出器内で上向きに走行する飛跡を残して飛び出て行く．これは，地球の反対側の半球から入射したニュートリノが，検出器の近傍で相互作用を起こした証である．

上向きに走行するミューオン（ニュートリノ反応で生成）と，おびただしい数の下向きに走行するミューオン（宇宙線ミューオン）を，どのようにして識別できるだろうか．一つの方法は，それぞれのミューオンが検出器の異なる場所を通過する際に，それぞれの時間を正確に測定することである．下向き走行ミューオンは，検出器の底面よりも上面に，幾分速い信号を与え，逆に，上向き走行ミューオンは検出器の底面にもっとも速い信号を生じる．このように，粒子の飛跡に沿った時間の相違は，走行方向を決める有効な手段となる．しかし，高さ 10 m の検出器でさえも，光速に近いスピードで走行す



宇宙ニュートリノ観測は，高エネルギー・ニュートリノが相互作用する標的物質として，地球そのものを利用する．その結果，地球の裏側から入射したニュートリノは地球との相互作用によってミューオンを生成し，このミューオンはニュートリノとほぼ同じ方向を保持して検出器に飛び込んでくる．このような方法で検出されるニュートリノの中には，地球の裏側の大気で生成されるニュートリノと，p. 270 に図示されているように，遠方の活動天体で同様な反応過程によって生成される本物の宇宙ニュートリノが含まれる．

る粒子に対して，上面と底面の間の時間差は，わずか 30 ナノ秒（0.03 マイクロ秒）である．そこで，検出器は時間的に近接した飛跡信号に対して，十分に分離できる性能を持っていなければならない．

地下に設置，大型，高時間分解能という特性は，遠方のニュートリノ点源を探索する第一世代の望遠鏡の特徴である．磁気単極子・天体粒子・宇宙線観測装置：MACRO（Monopole, Astrophysics and Cosmic Ray Observatory）は，イタリア中央部にあるグランサッソ研究所（第 6 章参照）の実験ホールの一つに建設された．イタリアとアメリカの実験チームが主力メンバーで，それに CERN から数人が加わった．

MACRO はニュートリノ望遠鏡の性能を超えた機能を備えている．いろんな種類の宇宙粒子，特に磁気単極子，すなわち単極の磁気（N 極又は S 極）を持つ仮想粒子などが検出できるように設計されている．装置の大きさは，高

さ 10 m，幅 12 m で，長さは全装置が完成すると 72 m にもなる．観測装置は，種々の異なる機能を持つ検出器が，それぞれ低放射能コンクリートで囲まれた巨大サンドイッチのような多層構造をしている．このコンクリートは，エネルギーを吸収する役目を担い，さらに検出器を透過する荷電粒子の粒子識別の手助けとなる．

これらの検出器群の中の幾つかの層は，平たい形状の液体シンチレータ検出器で構成されている．液体シンチレータは，すでに 40 年も前にニュートリノの発見に使用されたものと同じもので，荷電粒子が中を通過すると微弱な閃光を発する．この光に高い感応特性を持つ光電子増倍管は，これらの閃光を感知して電気信号に変換する．この信号は 1.7 ナノ秒の精度で，粒子が液体シンチレータ内を通過する時刻を告げる．この時間精度は，MACRO が年間に予想される数百の上向きミューオンと，1 千万ほどの下向きミューオンを分離できることを保証する．さらに，液体シンチレータが発する光量は，検知された粒子が持っているエネルギー量の目安となる．

MACRO 検出器のその他の層の役割は，時間情報よりはむしろ，荷電粒子の飛跡を一点一点，確認することに主眼が置かれている．これらは，それぞれ長さ 12 m，断面 3 cm^2 のプラスチック・チューブをイカダのように束ねて層にしている．このタイプの検出器は，しばしば MACRO チームのメンバーの 1 人である考案者：E. イアロッチの名前にちなんで，イアロッチ・チェンバーと呼ばれている．この検出器は，大面積を覆う粒子飛跡検出を比較的簡単な技術を用いて，また費用を節約しなければならない実験において利用された．それぞれのチューブには，その中心線に沿ってワイヤーが張ってあり，特殊な混合ガスで満たされている．ワイヤーに + の電圧をかけることによってチューブ内部に電場ができ，荷電粒子が入射して混合ガスをイオン化すると放電が起こる．各層のチューブに取り付けてある金属片のシートは放電を感知し，どのチューブが荷電粒子によって放電したかを知らせる電気信号を発生する．

上向きミューオンを測定することによって検出されるニュートリノのエネルギーは，MACRO では 10^9 eV 以上であり，ミューオン自身は生みの親のニュートリノの飛来方向と 1° 以内の角度相関を持っている．天球上の 1° の領域は月の大きさの 2 倍に相当し，MACRO で分解可能な最小領域である．

計算によると，地球の南半球の大気で作られたニュートリノが，MACRO 検出器内で上向きに通過するミューオンを生成する頻度は，天球上のそれぞれ 1° の領域に対して 10 年でわずか 1 個と少ない．そして，この数はすでにガンマー線を放出していることが確認された特定の天体から，ニュートリノもやって来ると仮定した場合の推定数より充分小さい．超高エネルギー・ガンマー線源として知られている，X 線連星系（1 つのパルサーともう 1 つの星（伴星）が互いの周りを回転している系）のベラ XI や LMC X4 は，MACRO 検出器に年 5〜10 個の上向きミューオンをプレゼントしてくれると予想される．これら南半球にある天体源は，地球をすかして宇宙を眺めるという通常の望遠鏡とは異なる MACRO の観測手法にとって，おあつらえ向きの位置にある．

1992 年の初めまでに，MACRO 検出器の全装置は完成しそうもないが，最初にできあがった一部分を用いて，1989 年の春に観測が開始した．3ヶ月の稼働期間中に，98000 個のミューオンが検出器の上面から底面を突き抜けていった．そして，1 個の上向きミューオンが観測された．少なくとも MACRO は下向きミューオンの中から，上向きミューオンを選別できることを証明した[注4]．

深水ニュートリノ

チェレンコフ放射を検出すれば荷電粒子の方向が同定できる．それゆえ，実験装置を地底の湖や，深海に建設することを提案する．[19]

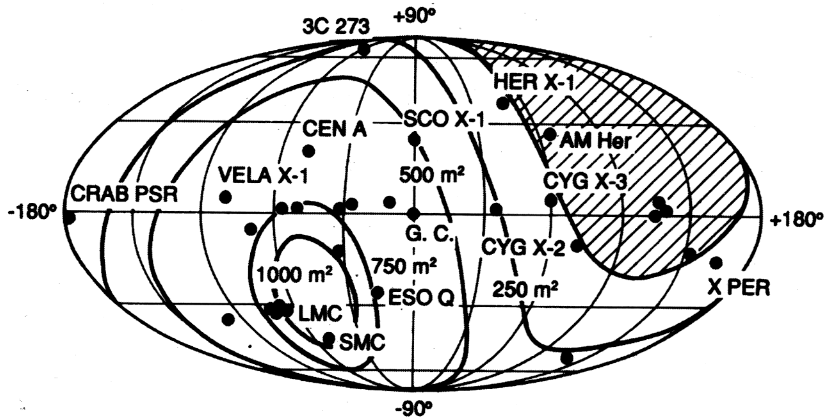
モイセイ・マルコフ，1960 年

水は地球上で最もありふれた物質の一つである．湖や海洋に蓄えられた水は，宇宙ニュートリノの検出に利用できる．大量の水の中を走行する高エネルギーミュー・ニュートリノは，小さいとはいえ，高エネルギーのミューオンを生成する有限の反応確率を持っている．そして，ミューオンは電荷を持って

注 4　1991 年から本格的に実験を開始した MACRO は，大気ニュートリノの研究に貢献したものの，宇宙起源の超高エネルギー・ニュートリノの発見にはいたらず，2000 年に実験を終了した．



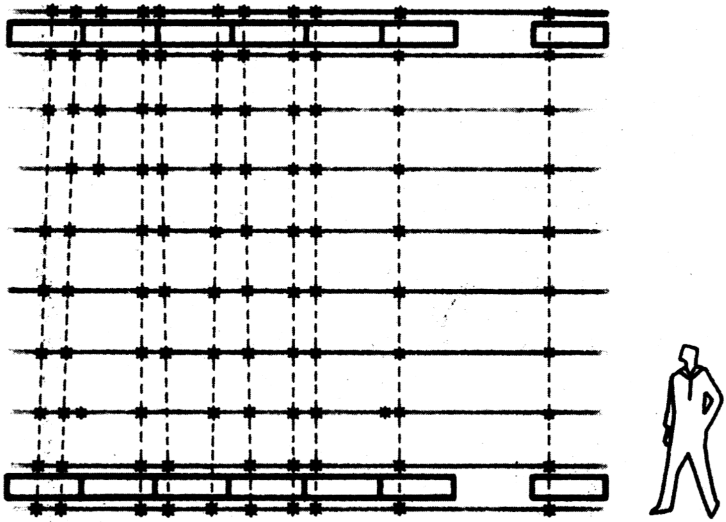
イタリアのグランサッソ研究所で建設中の MACRO 検出器．検出器はガスを封じ込めた多層の局部ストリーマ・チューブと，上部と底部に配置された液体シンチレータ層から構成されている．大きさは幅 12 m，高さ 12 m で，長手方向は最終的には実験室ホールに沿って 72 m まで拡張される．(G. ジャコメリ，MACRO)



MACRO 検出器によって観測される宇宙ニュートリノ天体の領域と，幾つかの有力な宇宙ニュートリノ天体源（黒丸）が図示されている．この図は銀河座標系を表し，天の川は長円形の中心（図中の G. C（銀河中心）（Galactic Center の略））を通る水平線上に広がる．MACRO は地球を透過して来るニュートリノを検出することから，イタリアにおいて地平線より上部の天空からやってくるニュートリノを検出することはできない．この図で，斜線部分がそれに相当する．

いることから，水中を走行する時にチェレンコフ光を放射する．モスクワの近くにあるドゥブナ原子核研究所の M. マルコフは，1960 年のロチェスター会議で，“湖や海洋に検出器を建設して，宇宙ミュー・ニュートリノによって作られるミューオンが発するチェレンコフ光を探そうではないか” と提案した．自然は，水という基本的な物質を無料で提供してくれる．このため検出器は大面積を覆いつくすことができ，頻度の極めて少ない超高エネルギー・ニュートリノを捕獲する機会が訪れる．

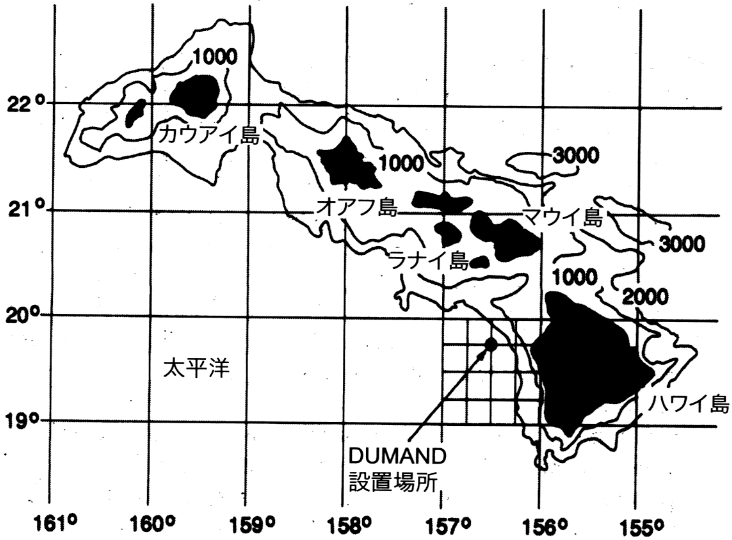
マルコフや同時期の人達のアイディアは，後に，前章で紹介した IMB やカミオカンデのような大型水チェレンコフ検出器に引き継がれた．この 2 つの検出器は，1980 年代前半に陽子崩壊を検出する目的で建設されたが，幸運にも超新星 SN1987A が出現した 1987 年 2 月 23 日の夜に，宇宙ニュートリノ検出器になった．しかしながら，深水ニュートリノ望遠鏡の当初の着想は，2 つの新しい国際プロジェクトの中で，ようやく具体化されようとしている．その 1 つは，マルコフの応援を得たバイカル湖水実験，ほかは，このアイディアをより発展させたハワイ島に近い海洋における実験である．



高エネルギー・ミューオンの一団が，初めて MACRO 検出器のスーパー・モジュールと呼ばれる検出器群を通過した時の飛跡を再構成した結果を示す．星印はそれぞれのミューオンが局部ストリーマ検出器をヒットし検知された場所．一方，箱型内の破線は，ミューオンが通過した痕跡を示す．ミューオンの一つが検出器内で止まっている．(G. ジャコメリ，MACRO)

ハワイ島周辺の海水は，ニュートリノ望遠鏡にとって十分過ぎるほどの完璧に近い水質をほこる．水そのものは非常に澄んでいて，湖の深い所にある新鮮な水よりもずっと透明度は高い．このため，光はほとんど吸収されずに数十 m も直進する．よって，チェレンコフ光を検知する光センサーを，十分離して取付けることが可能になる．さらに，検出器にとって大敵となる，島を巡回する強い潮流は存在しない．また，火山島の自然は，島が端で急激に落ち込み，それが深海にまで伸びているため，海洋は島に比較的近いところでも深く落ちこんでいる．

この海水はもうすぐデュマンド（DUMAND: the Deep Underwater Muon and Neutrino Detector）の本拠地になるだろう．このプロジェクトは，1973 年にデンバーで開かれた宇宙線国際会議と，のちのデュマンド研究集会での議論が発端となって立ち上がった．これらの会議から，DUMAND 計画を共同で推進する幾つかの特色あるグループが誕生した．カリフォルニア大学アーバ



深水検出器 DUMAND は，ハワイ諸島の中の"ビッグアイランド"と呼ばれているハワイ島の南西部の海岸に設置される．そこは水深が深く，他に例を見ないほど海水は透明である．水深は 1 単位 = 6 フィートで表されている．

イン校の F. ライネスによって始動したこの計画は，後年にジョン・ラーネッド，ヴィンス・ピーターソン，アート・ロバーツ，ヴィック・ステンガーなどハワイ大学の研究者の指導のもとで具体化された．その道のりは決して容易ではなかった．彼らには，素粒子物理学を海に持ち込むことから生じる避けがたい困難や，また，間違いによる検出器の設計変更が待ち構えていた．ジョン・ラーネッドは，次のように詳しく述べている：

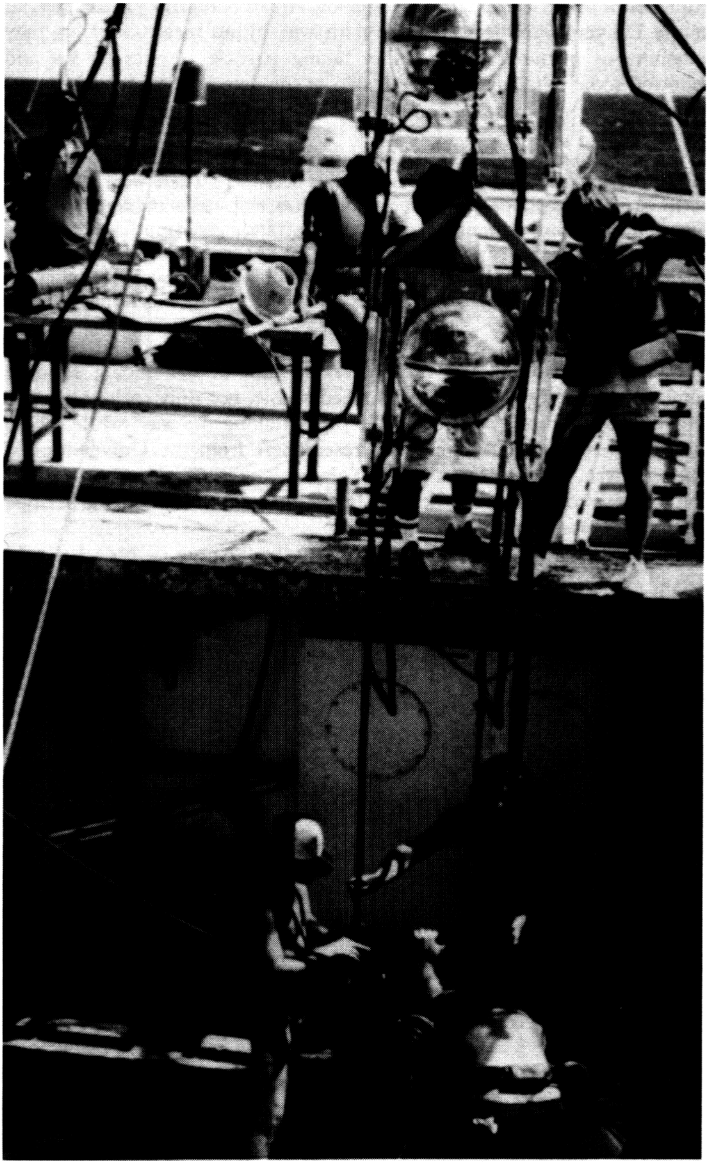
… 我々は高エネルギー物理学者と共に，荒々しく，手なずけ難い海洋から，数々の苦い教訓を学びながら，多くの冒険をおかした．… 人々が予見していた，例えば，深海の化け物（水深 2 km 以下では多くはないが）やキラキラと光を放つ魚やバクテリア（存在は稀で，人が実験装置を突いたり押したりしない限り，派手に動き回らない）のような，手ごわい潜在的な問題が存在する．… 最初，我々が DUMAND 計画について議論した時，加速器物理学者の友達は笑って，気が狂っていると言った（今では，彼らは，なぜ，まだ装置を稼働させないのかと問いかけてくる）．… 長い間の奮闘が続いたが，しかし，多くの楽しみもそこにはあった.[20]

また，DUMANDは技術面のみならず研究目的の面においても実現可能な計画だと，財政当局を説得することが主要な仕事であった．いろんな人達が，途中でプロジェクトから去っていったが，また多くが新たに加わった．1990年の時点では，アーヘン大，ベルン大，ボストン大，ハワイ大，キール大，東北大，東京大，ワシントン大シアトル校，ウィスコンシン大，ナッシュビルのヴァンデルビルト大，スクリップス海洋研究所の研究者が実験チームのメンバーに入っていた．

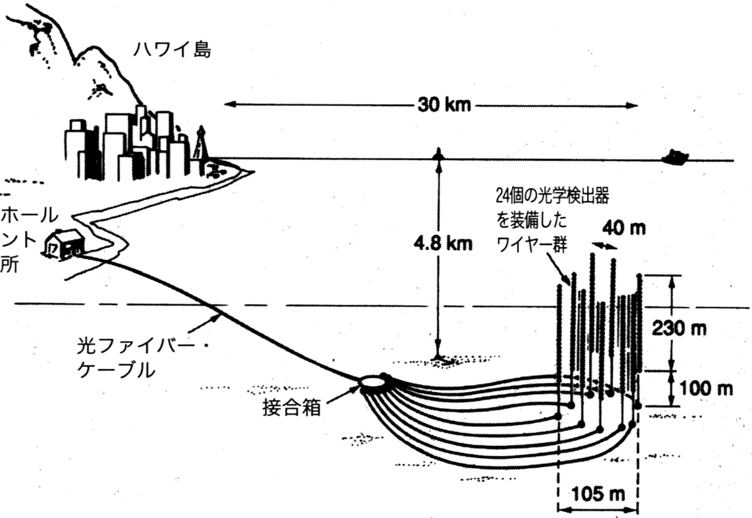
実験に適した場所を選ぶことや予測される危険を調査することは，全計画の一部分にすぎない．研究の主力は，チェレンコフ光を測定するための最も適した装置の設計に費やされなければならなかった．装置の設計目標は，大雑把とはいえ高感度の性能をもち，大型ではあるが扱いやすく，既存の技術を使用するとはいえさほど高価ではなく，そして，とりわけ数千mの深海で遭遇する高水圧に耐える能力を有することに置かれた．DUMAND検出器の設計チームは，測定器の一部分の雛形を海に沈めて数々の性能試験を繰り返した．そして，検出器に関連する種々の計算や性能検査において失敗を経験したが，最終的には満足する結果を得ることができた．

1987年10，11月に，DUMAND・チームのメンバーは，宇宙線ミューオンやニュートリノを検出するために，ハワイ諸島最大の島，ハワイ島の沖合い35kmの地点に出かけた．彼らを乗せたカイマリノ号は，船体の両側が海面に接し，中央部のプラットフォームが海面の上に出ている水中翼船に似た安定した構造を持っていた．船の中心部の吹き抜けから，いろんな検出装置群を固定したワイヤーが海面直下に投下され，今回のテストでは水面から約4kmの深さに沈められた．“短ワイヤー検出器”と呼ばれたこのワイヤーには，5m間隔に7組の光学検出器が吊るされた．これらの光学検出器はチェレンコフ光を検出すると信号を発し，ワイヤーの最下部にある信号制御部に転送する．信号制御部は光ファイバーをとおして再び信号を船上に転送し，計算機によるデータ解析が行われる．

ワイヤーの近くの海面から水中に入り，下向きに走行する高エネルギー・ミューオンは，その道筋にそって円錐状にチェレンコフ光を放出する．この光の一部分は，7個の光学検出器のそれぞれに捕らえられる．そして，光はワイヤーの底部よりも上部に，幾分早く到達する．このような時間間隔の検出



一本のワイヤーに7組の光検出器を備えたDUMAND Iのテストによって，ワイヤーの周囲400平方メートルの深水領域を通過するミューオンが検出され，DUMAND計画の有効性が示された．写真は，チームのメンバーがカイマリノ号の船体から，ワイヤーを沈めているところ．球状の光検出器がはっきりと見える．(ジョン・ラーネッド(DUMAND共同研究))



DUMAND II は，八角形の頂点に光学検出器を装備した8本のワイヤーと，もう1本を八角形の中心に配列した構造を持つ．この構造は沿岸から約30 km 沖合いの，水深4.8 km の地点に設置される．そして，1本の光ファイバー・ケーブルによって全ての実験データは，キーホールポイントの岸辺にある研究所に転送される．9本のそれぞれのワイヤーには10 m 間隔に光学検出器が取付けられ，最下部の検出器は海底から100 m 上に置かれる．

によって，ミューオンであることが示される．信号の相対的な強さは，ミューオンの飛跡とワイヤーとの距離の情報を与える．同様にして，水中を上向きに走るミューオンの時間情報はこの逆になる．ケニス・グライセンが1960年のカリフォルニア大学バークレイ校での会議で，水チェレンコフ検出器の実現性を議論し指摘したように，異なった方角を識別できる能力は必要条件である．

チェレンコフ検出器は，各々の事象の方向性を識別する能力を有していなければならない．このことは，水平方向や上向き方向の事象はニュートリノによるもののみであることから，バックグランド事象の混入を防ぐ助けとなる．[21]

“短ワイヤー検出器” を用いた実験は大成功に終わった．彼らは下向きミューオンのみならず，おそらくニュートリノによると考えられる1個の上向きミュー

オンを検出した．この結果は，また，7個の光学検出器を備えた一本のワイヤーが，IMB測定器の検出領域に匹敵する400 m^2 の領域を監視してミューオンを測定したことを示すもので，実験チームの技術力を実証した．

“短ワイヤー検出器” の成功は，1988年，実物スケールまたはDUMAND第二期計画の提案を実験チームに決断させた．そして，1990年春にこの計画は全面的に認可された．装置は光学検出器を繋いだ9本のワイヤーから構成されていて，その内の8本は一辺40 mの八角形の各頂点に配置され，9番目のワイヤーは八角形の中心に置かれる．各々のワイヤーには，10 m間隔に計24個の光学検出器が取付けられ，一番下の検出器は実験候補地の深度4800 mの海底からわずか100 m上部に位置する．各ワイヤーの海底固定点にある信号制御部は，接合箱と連結している．この接合箱はワイヤーからの信号情報をとりまとめ，これらのデータを40 km先のハワイ島，キーホールポイントまで光ファイバー・ケーブルによって転送する．キーホールポイントには，すでに海洋学研究のために使用されている研究センターがある．計画では1992年夏に，実験地点から海岸までケーブルを敷設し，光学検出器を備えた最後のワイヤーを1993年に設置することになっている．ジョン・ラーネッドは，次にように述べている：

> 資金と勤勉さと一握りの幸運があれば，1994年までに，ニュートリノ点源発見の第一報が出るだろう．…… もともと予測し難い現象の検出について推測することは（この場合は高エネルギー・ニュートリノ天文学の創始を意味する）冒険を伴う．しかしながら，もし，超高エネルギーのガンマー線観測の結果が正しければ，私たちは，DUMAND第二期計画で，少なくとも6個のニュートリノ天体源を観測できると期待している．[22]

非常に高いエネルギーの下向きミューオンだけが，光学検出器が配置されている深さにまで到達し信号を与える．その頻度は，1分間に3個と推定される．大気ニュートリノに由来する信号の数はもっと少なく，全方向で1日10個くらいだろう．天球上に強い高エネルギー・ニュートリノ点源が存在し，例えば，1年間に点源の周囲1度の角度内から10個以上の高エネルギー・ニュートリノが生成され，それらがDUMAND検出器内の水と反応を起こすなら，それらは大気ニュートリノによるバックグランド事象に邪魔されず，

はっきりと検知されるはずである[注5].

一方，東シベリアにある世界最高の透明度を誇る湖，バイカル湖でも，他の研究チームが200個の光電子増倍管を用いるニュートリノ望遠鏡計画（NT-200）を推進していた．1984〜5年来，イルクーツク，モスクワ，タンスク，ブタペスト，ベルリンから集まった研究者の国際チームは，850 m から 1350 m の水深で9個の光学検出器を取付けたワイヤーのテスト実験を行い，これに成功した．この実験でそれぞれの光学検出器は，4個の比較的小さな口径（15cm）の光電子増倍管から構成されていて，この内の2個は上を，他の2個は下を監視するよう配置されている．実験チームは2月から4月の間，バイカル湖を覆いつくす厚い氷の層を天然の作業場として利用できたため，冬に光学検出器を装備した複数本のワイヤーを，たいした難しさを伴うことなく湖水に沈めることができた．そして，彼らはソリに引かれた巨大なノコギリで氷を切断し細長い溝を作り，そこにケーブルを通すことによって信号伝送ケーブルを岸辺まで敷設した．

最終設計によると，6個の光学検出器（各検出器に4個の光電子増倍管がついている）を数珠つなぎにしたワイヤー各8本を用いて，装置全体で $3000\,\mathrm{m}^2$ の面積を覆う計画になっている．光電子増倍管は，テスト実験で使用したものより大きい，口径 35 cm の半球状の感光面を持つものに取り替えられる．彼らの目標は1993年までに全体の装置を配備し，そして地球の裏側から侵入し高エネルギー・ニュートリノの痕跡を与える上向き走行ミューオンの探索を開始する[注6].

F. ライネスと J.P.F. セルスコップが最初に大気ニュートリノを測定してから，25年経った今，二人は次のように書いている：

ニュートリノ天文学の将来を占うことは難しい．しかし，想像できない将来のエネルギー消費について巧妙な言い訳をするのと似ているが，35年前に始まったことが，結

注5 DUMAND 実験は数回のテスト実験が行われたものの，本実験の予算措置が認められず，1995年に実験グループは解散した．DUMAND の研究目標は，現在，ギリシャ西南端ピロス沖海底に建設中の NESTER と，フランスのマルセーユ沖海底に建設中の ANTARES に引き継がれた．

注6 Baikal NT-200 は1998年まで実験を継続したが，宇宙ニュートリノ事象は検出されなかった．

果として物理学者に自然を支配する基本的な力を素粒子レベルで究明することに加えて，太陽の中心で起こっている反応過程や，同様にもっと遠方の天体現象についても解き明かすことを，いつの日か可能にしてくれるだろう.[23]

パウリが謝罪しつつもニュートリノを導入してから 60 年経った．そして，ついに SN1987A の遠方の天体現象がニュートリノ天文学の威力を実証した．未来を予言することはどの基礎科学の分野でも同じように難しいが，ライネスとリロイ・プライスの最近の話を引用しよう：

ニュートリノ天文学の分野は，注目すべき，幾分偶然を伴って船出をした．今や大胆に，しかも強力に前進する時である.[24]

宇宙開闢時に・・・

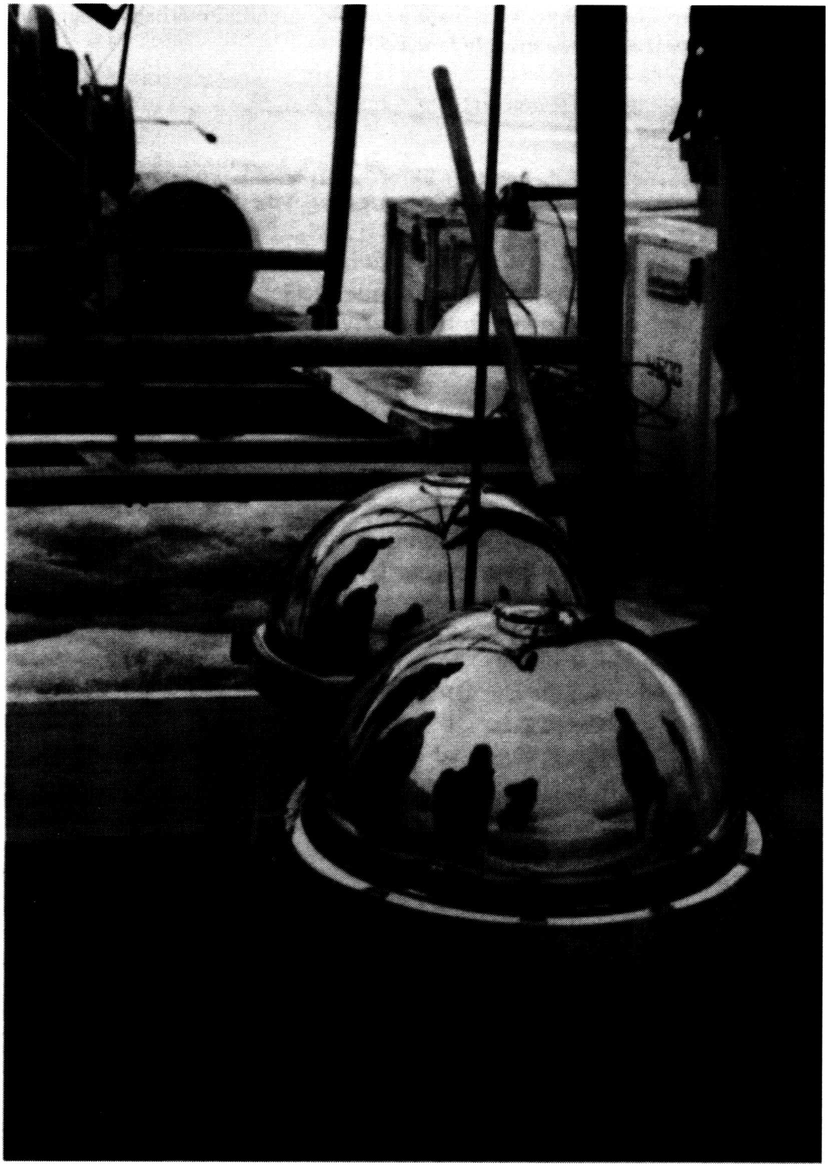
宇宙を理解しようとする試みは，人間生活を道化芝居のレベルから少し引き上げて，それに悲劇や優雅さを幾分加味することができる，非常に稀な行為の一つである.[25]

スティーブン・ワインバーグ，1977 年

ニュートリノは，星の中の核融合反応や壮絶な星の死，または宇宙加速器と呼ばれる特異な天体で生成され，宇宙空間を駆け巡る．しかし，宇宙初期のずっと昔に存在した古い発生源がある．ここで作られたニュートリノは，過ぎ去った時代の遺物として現存している．この発生源とは原始宇宙，すなわち宇宙開闢からわずか 1 秒経過した宇宙である．その時に存在していたすべてのニュートリノは現在の宇宙全体に浸透し，その数は宇宙空間のどこでも 1 cm^3 当たり数百個と推定される．まさに宇宙進化の生き証人といえる．

現時点の宇宙標準理論とは，ビッグバン宇宙論として知られているものをさす．この理論によれば，宇宙は無限に近い超高密度と超高温の状態のビッグバンの瞬間，つまり時間原点の状態から今日まで膨張を続けている．宇宙は膨張するにつれて冷えてきた．我々はまだ宇宙の初期状態を記述する正しい理論を持っていない．しかし，宇宙が冷えていくにつれてそれぞれの異なった時期に，宇宙がどのような状態であったかを記述することに対して，我々がよく理解している物理学の諸理論を使用することができる．

ビッグバンから約 150 億年の歳月の間に，宇宙物質は我々が今日，地球，



NT-200の実験チームのメンバーは，深水ニュートリノ検出器のためのテスト実験装置を沈めるのに，冬季間，バイカル湖面を覆う厚い氷の層を利用する．このテスト装置の光学検出器は，一対の口径35 cm光電子増倍管から構成され，氷の下の湖水に吊るされる．光電子増倍管の球面はガラス製で，数kmの深さまでの水圧に耐えるように設計されている．

太陽，銀河やその他の天体を構成する原子や原子核の形で見ることができるような物質に進化をとげた．さらに驚くべきことに，おそらく物質に作用しその運動を支配する力もまた，宇宙の冷却とともに進化したと考えられている．現在の宇宙では，原子核内に働く強い力は，陽子同士の間の電気的斥力に十分打ち勝つくらい強い．弱い力は，太陽が数十億年に渡って輝き続けることができるほど十分弱い．しかしながら，宇宙の極めて初期の高温状態では，これらの力の強さは等しかったと考えられている．W や Z^0 粒子を媒介する弱い相互作用は，グルーオンを媒介する強い相互作用とほぼ同じ頻度で起きていた．それゆえ，ビッグバンの時には，強い力，電磁気力，弱い力のみならず重力を含む一つの統一力が存在していたようである．そしてやがて宇宙が冷えるにつれて，現在強さが異なって見える基本的な力が，この統一力から分離していった．このことは，焼いている肉からしたたり落ちる脂肪が冷えて，ゼリー状の物質に析出するのと似ている．

ビッグバン直後の最初の瞬間は，宇宙は力を媒介する光子，グルーオン，W や Z^0 粒子とともに，クォークやレプトン，さらに存在の可能性があるにもかかわらずまだ発見されていない粒子を含む，素粒子の群の超高温スープ状態であった．このような高温状態では，全ての素粒子が持つ平均エネルギーがあまりにも高いため，安定な陽子や中性子の形成が難しく，原子核や原子をそのままの状態に保つことができない．しかし，ひとたび宇宙が冷えだすと，温度とともに平均エネルギーも下がり，まずクォークが結合して陽子や中性子が形成され，その後，原子核さらに後に原子が形成されるだろう．そして，ゆくゆくは原子同士が結集して星や銀河ができ，私達が今日見ることができるような宇宙が形成されたと考えられている．

膨張宇宙

我々がやらなければならないことは，宇宙膨張に関する数々の相対論的方程式や種々の原子核反応にかかわる実験データを正しいと受け入れ，それらに基づく計算結果が宇宙における我々の知っている元素の各種について，その存在量の観測データと一致するかどうかを調べることである．[26]

ジョージ・ガモフ，1952 年

火の玉ビッグバン理論は，1940 年代にガモフ自身が“宇宙初期圧力の料理人”と呼んだ，彼の提案に端を発した．その提案とは，宇宙の基本的な元素は現在の宇宙で観測される元素の存在比を実現するように調合されていた，とする考えである．ガモフはロシア人の物理学者で，米国に移住し，ワシントン州にあるジョージ・ワシントン大学の教授になった．1920 年代後半に彼は量子トンネル現象のメカニズムを考案し，1935 年に“いかにして熱核融合反応が太陽のような星を燃やし続けるのか(第 6 章参照)”を説明しようとした．そして 1940 年代になると，“星の中でどのようにして元素が形成されるのか”という理論的考察の後に，当時，多くの研究者が挑戦していた課題，“宇宙初期の元素合成”に目を向けた．

ガモフの“宇宙初期の元素合成”に関する原論文は 1946 年に，引き続き，学生のラルフ・アルファーと一緒に書いた有名な論文“化学元素の起源”が 1948 年に発表された．典型的な悪ふざけ好きのガモフは，著者名が α, β, γ の順に並ぶように，ハンス・ベーテの許可を得て彼の名前を論文に追加し，アルファー，ベーテ，ガモフを著者とした．アルファベト順の著者名は，この論文が全く偶然にも論文誌“Physical Review”73 巻に 4 月 1 日付けで発行されたことで，幾分，意味が薄れた．(さらに，このあとの論文でガモフやアルファーと一緒に仕事をしたロバート・ハーマンが，デルターという名前に改名する提案を拒んだことに，ガモフは大いにくやんだ！)

ガモフと彼の共同研究者達の目的は，宇宙膨張の条件のもとで，現在の宇宙で観測されている元素の存在量を説明することであった．アメリカの天文学者，エドウィン・ハッブルは，1929 年に宇宙膨張の証拠を初めてつきとめた．1912 年頃から開始された観測結果は，多くの銀河が我々から遠ざかっていることを示していた．そして，ハッブルはさらに研究を進め，これらの銀河までの距離を求め，銀河が我々から遠くにあればあるほど，より遠ざかる速さが大きいことを確認した．この明快な比例関係は，今日，ハッブルの法則として誰もが知るものとなった．

もし，私達が宇宙の中で特権を与えられて特別の空間に住んでいることを放棄するなら，言い換えれば，全ての銀河がハッブルの法則にしたがって互いに隔たっていると仮定するなら，速度と距離の関係は宇宙全般に渡って重要な意味を持つ．速度と距離の比例関係は，もし宇宙が膨張していれば必ず

予見される．アーサー・エディントンは彼の本，“The Expanding Universe” の中で，彼や同年代の研究者がハッブルの発見から直ぐに思い浮かべた宇宙像を，次のように書いている：

… もし，あなたが宇宙大構造の研究に従事している人達に，“頭の中で描く宇宙像とはどのようなものか” と尋ねるなら … それは膨張する宇宙である．全ての銀河を含む超銀河系は，“プット” 吹かれた煙が輪をつくって拡がるように離散していく.[27]

ハッブルの法則を膨張宇宙に照らして解釈すると，必然的に宇宙年齢に辿り着く．もし，全ての銀河が互いに遠ざかっていくなら，過去には，それらは共に近接していたに違いない．そして，宇宙の始まりと定義される時点では，全てが同一の場所にいなければならない．ハッブル定数の測定値から，どのくらいの過去に銀河が一点に集まっていたかが計算され，(100〜200) 億年の答えが出てくる．この答えは幸いにも地球年齢の推定と矛盾しない．地球の年齢は岩石中の放射能測定などから求めることができ，宇宙膨張と全く無関係な測定に基づいている．(初期のハッブル定数の測定値に対しては，必ずしもそうではなく，宇宙の年齢が地球の年齢より若かった．しかし，その後，天文観測の技術の進歩によって，現在使用されているハッブル定数が求まり，自己矛盾のないビッグバン宇宙論が確立した.)

宇宙膨張それ自身は，ビッグバンに対する証拠ではない．ビッグバン宇宙は，理論上の基本法則ともいうべきものである．これを証明するには，他の事実を検証しければならない．何を調べればよいか，その手がかりは 1948 年のガモフの共同研究者，アルファーとハーマンによって発表されたネイチャー誌の論文の中に見出すことができる．この論文は，ネイチャー誌の同じ巻に一足早く掲載されたガモフの考えを改良したもので，宇宙創成の 1 秒後から物質と輻射の密度が等しくなる銀河の種が形成される時点までにわたる，宇宙における物質と輻射の進化に関する論文であった．輻射で満ちた空間に散りばめられた中性子からなる高密度で，それゆえ高温の宇宙が出発点となっている．その後，中性子は崩壊して陽子が誕生する，この陽子と中性子が結合して重水素が形成される．この先は，開闢 1 秒後の物質と輻射の密度を計算して，双方の密度が等しくなる時点まで外挿する．

ガモフの手法には，幾つかの誤りが含まれていたのみならず，彼の外挿の結

果は余りにも長い時間スケールを与え，原子を形成することができない．そして，得られた宇宙年齢は万人が認めている年齢よりも長い．アルファーとハーマンは，外挿ではなく，密度の進化を追跡する手法を開発した．その結果，宇宙開闢の約1千万年後に輻射が衰えて物質と均衡することなど，よりもっともらしい時間スケールの導出に成功した．さらに，彼らは現時点の宇宙に漂う輻射の温度を絶対温度5Kと推定した：

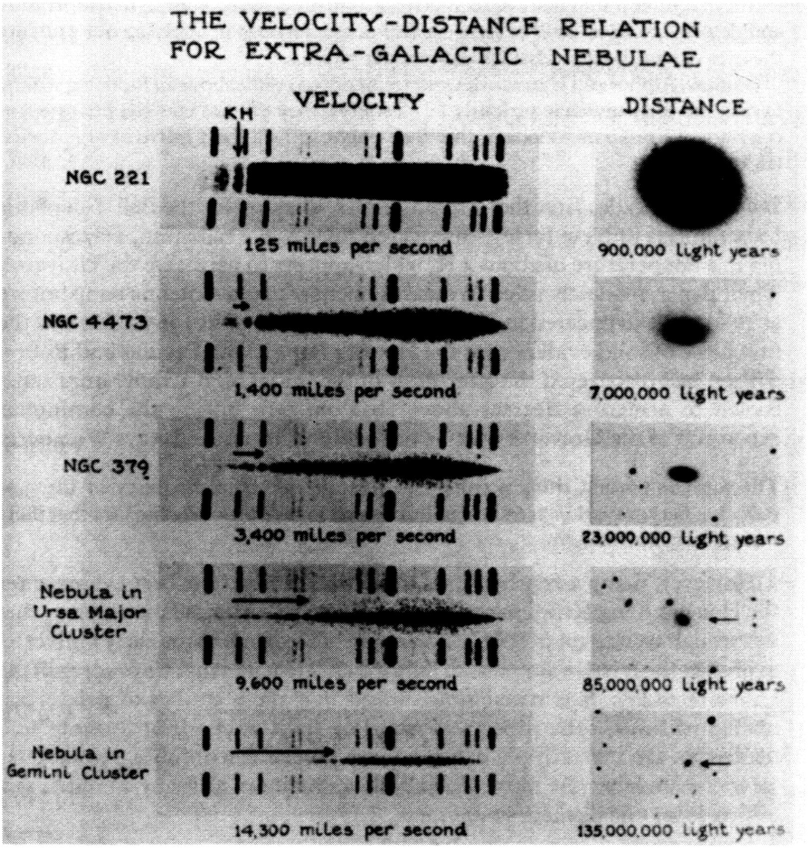
> ガスが凝縮を開始する温度が600Kで，宇宙の温度は現在約5Kであることが分かる.[28]

灼熱の初期宇宙で生まれた高エネルギー・ガンマー線の光子は，宇宙膨張により現在の宇宙ができるまでの間に，低エネルギーの5K輻射のマイクロ波に変貌した．

このような理論上の指摘は，多かれ少なかれ認められずに時が過ぎ去った．ワインバーグが "宇宙創成初めの3分間" の本の中で述べているように，当時，宇宙初期のどんな理論も深刻に検討するような時代ではなかった．ワインバーグはさらに：

> … 最初の3分間は，現在の宇宙から時間的に余りにもかけ離れ過ぎ，温度や密度の状態も全く馴染みがないために，通常の統計力学や原子核物理学の理論を適用することに不自然さを感じる．…
>
> ガモフとアルファー，ハーマンは初期宇宙を真剣に取り扱おうとした点で，比類ない名声に値する．… しかし，彼らをしても，電波天文学者にマイクロ波背景輻射を捜すべきだ，と確信させる最後の手段に踏み込めなかった.[29]

ニュージャージーにあるベル電信電話研究所の2人の物理学者が，宇宙に充満しているかのように振舞う約3Kの温度に相当するマイクロ波を発見したのは，それから20年後であった．1965年の "Astrophysics Journal" 誌に掲載された彼らの論文には，"4080メガサイクル/秒における過剰なアンテナ温度の測定" という控えめな題が付けられていた．これが熱いビッグバン宇宙に対する最初の確かな証拠となった．アーノ・ペンジャスとロバート・ウィルソンは，150億年におよぶ連続した宇宙膨張の間に絶対温度3Kにまで冷えしまった，宇宙初期の高温状態の残光を発見したのだ．ワインバーグは次のように言っている：



右側に図示されている距離が異なる一連の銀河において，その後退速度の増加は，左図のデータを注意深く分光解析することによって求められた．各銀河の光の波長分布の観測結果が，長く引き伸ばされた黒い部分である．それぞれの波長分布の上下に映っているいくつもの黒い縦状の帯は，実験室に備えてある標準のヘリウム光源のスペクトルをあらわす．各銀河のスペクトルにおいて，カルシウムの吸収による一対の輝線（K と H）が観測されている．それらの輝線は下の銀河に移るに連れて，スペクトラムのより赤い方に（図の右側）移動している．これは，銀河の我々から遠ざかる速さが増加しているためである．この後退速度は，銀河の距離に直接，関係している．そして，宇宙が膨張している確かな証拠を与える．

1965 年の究極の 3 K 背景輻射発見がもたらした最も大切な点は，我々全てが宇宙に始まりがあったことを，真剣に受け止めなければならなくなったことだ．[30]

しかしながら，多くの天体物理学者は，熱いビッグバン宇宙の最良の証拠はガモフの元々の着想によってもたらされると主張した．すなわち，初期宇宙における元素合成の理論を用いて，今日の宇宙で観測される軽元素の相対存在量を予言することである．確かに陽子と中性子から軽い原子核を形成する手法，“宇宙初期の元素合成” の研究が，150 億年後に観測された元素の存在量を正確に言い当てることができるとは驚ききわまりない．しかも，互いの軽元素同士は 10^9 の存在量の違いがあるからこの上もない．

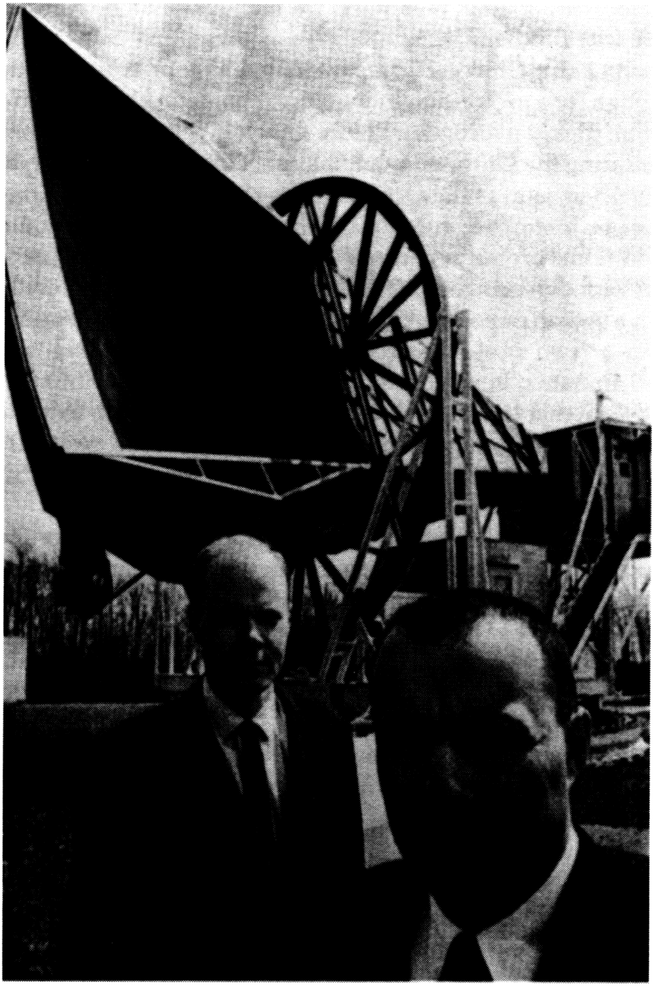
宇宙の料理人

素粒子の数には制限があるに違いない．もし，そうでなければ，宇宙は我々が知っている宇宙とかけ離れたものになるからである．[31]

デビット・シュラム，ゲーリー・シュタイグマン，1988 年

ビッグバン元素合成は，宇宙誕生から最初の 10 万分の 1 秒後に宇宙に起こったことを説明してくれる．この時までに宇宙は膨張し，1 兆度（絶対温度）にまで冷えた．そして，陽子と中性子はクォークとグルーオンから成り立っていた初期の高エネルギー・スープ状態から，固化して析出するかのようにして生まれた．その時点では，ニュートリノ，電子，ミューオンとそれらの反粒子は光子と同様，陽子や中性子よりも数で上回り，数密度の比は約 10 億 : 1 であった．まず，陽子と中性子は平衡状態にあると考えられる．すなわち，陽子は反ニュートリノとの弱い相互作用を通して中性子に変わる．そしてすぐに，中性子はニュートリノとの弱い相互作用によって陽子に転換する．しかし，宇宙は膨張を続けさらに冷えるため，弱い相互作用の反応頻度は衰え，中性子が通常のベータ崩壊によって陽子に転換する反応のみが顕著になる．その結果，陽子の数が中性子の数を上回ってくる．

宇宙が 1 秒の歳を取るまでに，その温度は 100 億度に，平均エネルギーは 1 MeV に下がった．この時点で，弱い相互作用が引き起こす反応の速さは，宇宙膨張の速さよりも小さいので，これ以降，陽子や中性子に残っている弱い相互作用は，中性子のベータ崩壊のみとなった．そして既に，宇宙における陽子と中性子の存在比は，陽子 3 個につき中性子 1 個以下になっていた．



アーノ・ペンジャス（左）とロバート・ウィルソン（右）．高温ビッグバン宇宙の名残りを現在に留める宇宙背景マイクロ波輻射を発見した角型アンテナの前で．(ベル研究所)

そして，宇宙はひたすら逆らうことのできない膨張を続ける．ではその間に，他になにも起こらないのだろうか．残っている中性子は引き続き次の 15 分間に，ただ崩壊して消えるのみなのか．実はそうではなく，ほぼ 2 分以内に中

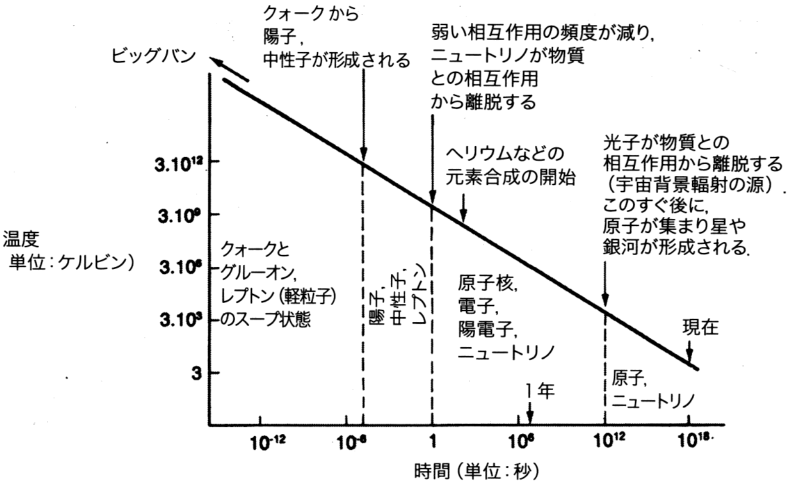
性子は単純な原子核の中に閉じ込められるようになる．すなわち，ビッグバンの100秒後から元素を創り出す元素合成が始まる．

今や宇宙の温度は10億度に下がり，陽子と中性子が一緒になって重陽子（1個の中性子を持つ重い陽子）の原子核を形成するほど十分低くなった．これ以前は宇宙の温度が高く，宇宙に充満している放射（光子）は重陽子が形成されるや否や，それらを分解するに十分なエネルギーを持っていた．しかし今や，重陽子原子核は他の陽子や中性子と相互作用して，ヘリウム3やトリチウム（2個の中性子を持つ水素）を作ることができるようになる．そして，ヘリウム3やトリチウムは同様に，陽子や中性子とそれぞれ反応して，非常に安定な原子核ヘリウム4（2個の陽子と2個の中性子から構成される）を生成する．リシウム7は僅かな量とはいえ，ヘリウム4とトリチウムとの反応によって生成される．この段階で重要なことは，温度が重陽子を合成するくらいに十分に低いにもかかわらず，ガモフの量子トンネル効果によって正電荷の原子核同士が，電気的斥力に打ち勝って結合するにはまだ高い．

リシウムよりも重い元素は，この宇宙初期の“るつぼ”の中では合成されない．それは，ヘリウム4と陽子または中性子との相互作用や，2個のヘリウム4同志の相互作用によって，安定な原子核が作れないためである．重い元素を合成するには，3個のヘリウムが融合して炭素12を作っている太陽のような，星の中心部の高温，高密度状態を必要とする．現時点は，最初の星が燃焼を始め，新しい重元素が生まれる30万年以上も前の状態である．

初期宇宙における元素合成のラッシュは，3分少し過ぎまで続いた．この頃になると，最初の1秒が経過した後にベータ崩壊するだけとなった中性子の全ては，主としてヘリウム4原子核の中に，幾分少ない量ではあるが重陽子やヘリウム3に，さらに少量がリシウム7の中に閉じ込められた．最も軽い原子核の水素や，重陽子，ヘリウム，リシウムの相対存在量は，その後の宇宙がこれらを種に進化したことから，現在まで一定のはずである．しかしながら，宇宙の温度が3000度にまで下がり，原子核がついに電子を捕獲して周回軌道内に束縛することによって原子が形成されるまでには，さらに30万年の時間を必要とした．そして，その直後に星や銀河形成が始まる．

原子核を構成する粒子のさらに内部に潜むクォークやグルーオンと同様に，電子は最も早い時期から宇宙に実在していた．中性子と陽子が宇宙創成100



ビッグバン初期の高温状態から膨張によって宇宙は冷え，今日の 3K（ケルビン）まで温度は下がる．この冷却過程において，宇宙はさまざまな局面に遭遇する．例えば，宇宙全体のエネルギーが原子核の結合エネルギーよりも小さくなると，ヘリウムなどの軽元素合成が始まる．これは，宇宙創成 3 分間のできごとである．しかし，宇宙が冷えて電子が原子核に束縛され，原子が形成されるようになるまでに，30 万年の時間を要した．

分の 1 秒ほど後に凝結し始める時，この時期の“宇宙大るつぼ”の中はクォークやグルーオンのみならず，電子，ニュートリノと光子が含まれていた．つまり，光子は電子―陽電子対を生成するが，これらは直ぐに対消滅して光子に戻る．また，ニュートリノと反ニュートリノも同様に，弱い相互作用を通しての電子―陽電子対生成と，電子―陽電子対消滅によるニュートリノ―反ニュートリノ対生成の繰り返しによって，平衡状態を保っている．

1969 年にモスクワ州立大学のシバルツマンは，次のことを指摘した：現在の宇宙に存在するヘリウムの量の中で，第 6 章に記述されているような星の中心部で作られたものとは別の初期宇宙元素合成によって作られる量は，元素合成が始まる前の宇宙に充満していた，質量の軽い粒子の数密度に依存する．特に，シバルツマンは “DZPs” (Difficult-to-observe Particles with Zero rest mass)[32] について言及した．この “DZPs” には，宇宙が超高密度であった時期に“宇宙大ルツボ”内の反応から取り残された，未知の超微弱相

互作用をする粒子の存在が議論されていた．JETP 速報誌に掲載された論文の中で彼は，このような粒子（DZPs）の現在の宇宙における数密度は，もし元素合成によって作られるヘリウム原子核の存在質量比が当時受け入れられていた値の 40%以下であるなら，マイクロ波背景輻射の密度の 5 倍以下でなければならないことを示した．

このような制限が出てくる理由は，初期宇宙の膨張の度合いと基本的相互作用による反応の度合いが，相互に強く影響を及ぼしあうからである．ある時期に，輻射と平衡状態にある粒子の種類が多ければ多いほど，その時期のエネルギー密度は大きくなり，これによって膨張の度合いが速くなる．もし，元素合成が始まる直前に，宇宙がより速く膨張していたとすれば，宇宙膨張の度合いが陽子や中性子に働く弱い相互作用の度合いよりも速くなった時点で，陽子に対して中性子の割合はより大きくなるはずである．しかも，宇宙が十分に冷えて元素合成によって重陽子原子核が生成されるまでに，中性子が崩壊できる時間間隔は短縮されるだろう．このように，より急激な宇宙膨張の帰結は，元素合成時により多くの中性子が残存し，その結果，より多くのヘリウムが合成される．

シバルツマンの研究は後に多くの人達によって引き継がれた．しかし，素粒子物理学者達は予期せぬ現象を説明するために，新しい未知の粒子の導入を無条件に受け入れることはなかった．どんな新粒子も素粒子理論の枠組みに適合しなければならず，その上，ビッグバンの始まりから，今日観測されている宇宙に至るまでの宇宙の進化を説明できるような特性をもたなければならない．特にシュタイングマン，シュラム，J．ガンは 1977 年の初めに，元素合成が始まる前に存在していたニュートリノの種類が，今日観測されている宇宙初期ヘリウム量と深く係わっていることを指摘した．

これら 3 人のアメリカ人天体物理学者は，1976 年の M．パールと彼の共同研究者による第 3 番目のレプトン：タウ粒子の発見の知らせ（第 4 章参照）を聞いて，ヒントを得た．シュタイングマン，シュラム，ガンは，電荷を持たないタウ粒子のパートナーである第 3 番目のニュートリノの存在が，宇宙初期の膨張を加速し，それゆえ，これまでの予測よりも多くのヘリウムが現存しなければならないことを示した．1976 年 11 月末に論文誌 “Physics Letters” に投稿し 1977 年 1 月に掲載された論文の中で，もしビッグバン宇宙における

元素合成の計算が，宇宙全体のヘリウムの相対存在比を正しく再現していると仮定するなら，質量の軽いニュートリノ（電子ニュートリノやミューニュートリノを含む）の数は多くて7個であると指摘した．しかし，彼らは結論で次のような但し書きを加えている：

もちろん標準ビッグバン理論は決して厳密には証明されてはいないけれども，観測と矛盾しない最も簡潔な理論であることは心に留めて置くべきである．[33]

その後数年たち，多くの実験データが集積されるにつれて，また測定の精度が向上するにつれて，ビッグバン理論はヘリウム4と重陽子の正確な合成量を与える唯一の天体物理学理論となった．そして，理論の整合性を唱える声は，日増しに高まった．1984年6月，シュラムとシュタイグマンは，ジョンマン・ヤン，マイケル・ターナ，キース・オリーブとともに，論文誌 “Astrophysical Journal” に以下の文章で始まる大作の論文を展開した．

標準的な（簡潔な）熱いビッグバン理論を多くの研究者が受け入れてくれる．その根底には，この理論が軽元素，特にヘリウム4と重陽子の存在量を導出することに成功したからだ．[34]

この論文はさらに，軽いニュートリノは多くとも4種類が限度で，かろうじて第4番目の未知のニュートリノの存在が許されるという制限を加えた．このようにしばらくの間，初期宇宙の元素合成はニュートリノの数の上限値に関して，素粒子実験の結果よりもずっと厳しい限界を与えた．しかし，1989年になってようやく，CERN の LEP 加速器実験や SLAC での SLC 加速器実験において，もっときつい制限が付けられることになった．すなわち，電子—陽電子衝突で生成された Z^0 粒子崩壊の測定から，軽いニュートリノの種類は3よりは多くないことが示されたのである．

宇宙背景ニュートリノ

初期宇宙の標準理論に対するもっとも劇的な検証は，宇宙背景ニュートリノの検出であろう．[35]

スティーブン・ワインバーグ，1977年

開闢直後の宇宙は"輻射優勢"であった．つまり，宇宙のエネルギーは，光子とほぼ光に近い速さで動き回るそのほかの粒子が担っていた．これと対照的に，現在の宇宙は"物質優勢"である．宇宙が膨張して温度が下がるにつれて，光子のエネルギーは小さくなってしまった．その結果，現在の宇宙のエネルギーの大部分は，エネルギーそのものは小さいけれども質量の重い粒子，すなわち原子核の構成要素である陽子や中性子に受け継がれた．宇宙初期の輻射優勢の時代には，宇宙は熱平衡状態にある輻射ガスのようなものと考えられる．このような状態に対しては，ある温度，すなわち宇宙開闢後のある時間経過した時点で，ガス中の光子やそれと反応平衡にある粒子の密度は比較的簡単に計算できる．実際に密度は，粒子のスピンが決め手となる．ここで，光子のスピン = 1，ニュートリノ = 1/2．このことは，宇宙開闢から1秒ほどの間，3種類のニュートリノ数はそれぞれ光子と同数であるので，もしニュートリノが第4章でのべたように粒子と反粒子が異なるディラック粒子なら，全ニュートリノと光子の密度比は3/2になる．（もし，粒子と反粒子が同一のマヨナラ粒子とすれば，ニュートリノの数は半分になり，その密度比は3/4になる.）

宇宙が膨張によって開闢1秒後に100億度近くにまで冷えた時，ニュートリノが及ぼす弱い相互作用の度合いは，宇宙膨張の度合いよりも遅くなった．この時点で，ニュートリノはもはや他の粒子と反応することによって粒子生成・消滅を繰返す熱的平衡状態から置き去りにされ，以来，ニュートリノの密度は宇宙が膨張するにつれて希薄になった．そして，50万年後の宇宙において，同じような熱的平衡状態からの離脱が光子に起こった．この時，宇宙の温度は3000度まで冷えてしまった．この温度は0.3 eVの光子エネルギーに相当する．このエネルギーでは，光子は元素合成によって生成された原子核と電子の結合系（原子）から電子を引き離すことができず，この時点から，中性原子，特に水素やヘリウム原子の形成が始まる．一方，初期宇宙から生き残った光子は，以降，宇宙の熱平衡状態から取残され，宇宙膨張に身を任せながら温度2.7 Kにまで冷えて現在に至った．そして，この光子そのものが，ペンジャスとウィルソンによってマイクロ波背景輻射として検出された残存光子である．測定から現在の宇宙で，1立方センチメートル当たり約400個の光子の存在が確認された．

同様に宇宙の熱平衡状態から離脱したニュートリノの現在の残存数は，それぞれの種類のニュートリノに対して，単に残存光子数の 3/2（ニュートリノがマヨラナ粒子の場合は 3/4）であろう．しかしながら，宇宙の初期に話を戻すと，温度が 100 億度でニュートリノが熱平衡から離脱した直ぐ後に，何かが光子の数を変えた．宇宙の温度が 30 億度以下になると，光子にはもはや電子—陽電子対を生成するに十分なエネルギーがない．つまり，光子は平衡状態に留まることができない．一方で電子—陽電子消滅は引き続き起こるため，電子と陽電子の数が減少する中で，光子の数は増加する．実に光子の数は 3 倍近くになるはずである．以上の議論から，1 種類のニュートリノの残存数は，光子数の半分（または 1/4）でなければならないことを意味している．

残存ニュートリノの数はこんなに多い．もし，ニュートリノが 3 種類であるなら，残存ニュートリノの数は宇宙空間の 1 cm^3 当たり 300（マヨラナ粒子）個ないし 600（ディラック粒子）個になる．もちろん，この数はニュートリノが安定か，少なくとも宇宙年齢の 150 億年以上の寿命を持つことを仮定している．この背景ニュートリノを検出できるかどうかは，物理学者の知恵と腕にかかっている．これまでの議論ではニュートリノの質量は 0 と仮定してきたが，いくつかの，または全てのニュートリノが十分安定で質量を持つとしたら，これまでのシナリオはどうなるのか．

そもそも宇宙膨張は止むのだろうか？ その答えは，宇宙に存在する物質の量，もっと正確にはエネルギー密度によって決まる．もし，密度が十分大きければ，膨張はやがて止まり宇宙は収縮に転じる．つまり，宇宙は“閉じ”てしまう．逆に，密度が宇宙膨張を止めるほど大きくなければ，宇宙は永遠に膨張し続けるだろう．この場合を“開いた”宇宙という．3 番目の可能性は，密度が無限時間後に膨張を止めるに十分とはいえ，決して収縮に転じるほどの量でない時で，これを“平坦”宇宙という．

平坦宇宙に対して要求される密度を臨界密度と呼ぶ．この値はニュートン重力定数と，銀河の後退速度と距離を関係付けるハッブル定数がわかれば計算できる．ハッブル定数の観測値の不定性は 2 倍以内におさまっている．この不定性は（3〜10）keV/cm^3 の幅を持つ臨界密度の値を求めるのに十分である．現在の宇宙には，0.0003 eV のエネルギーを持つ 400 個/cm^3 の背景輻

射が満ちている．そして，宇宙の全エネルギー密度への寄与は 0.12 eV/cm^3 に等しく，臨界密度の 10 万分の 1 以下である．

もし，ニュートリノの質量が零なら，背景ニュートリノが宇宙エネルギー密度に与える効果は全くない．しかし，わずかでも質量を持つとなると，様相は一変する．例えば 30 eV の質量があれば，100 個/cm^3 の背景ニュートリノの存在は，3 keV/cm^3 のエネルギー密度を生じ，臨界密度の値に近づく．ほとんど個性を持たないニュートリノが，宇宙の運命を決定する可能性を秘めているとは驚きである．ニュートリノはある意味で，宇宙の支配者となるかもしれない．

しかし，ニュートリノの質量を測定することの難しさは，誰もが認めている．第3章で述べたように，1981 年のモスクワ・チームによる実験は，電子ニュートリノの質量が(20〜40)eV の範囲にあると報告した．この結果は，宇宙論のみならず素粒子物理学の研究者に，異常なまでの興奮を巻き起こした．しかしながら，10 年後の 1991 年までに行われたその他の多くの実験結果から，電子ニュートリノの質量が 15 eV 以下であることと，モスクワ・チームが測定データの解析において，おそらくなんらかの間違いを犯したことが明らかになった．一方，ミューニュートリノやタウニュートリノの質量に対して，現時点での実験室レベルの測定から電子ニュートリノと比べてはるかに大きな 250 keV と 35 MeV の上限値が得られているに過ぎない．

ところが，宇宙論に基づく解析からニュートリノの質量に対してもっと厳しい制限が付け加えられる．非常に難しい測定である宇宙膨張の度合いの測定データは，宇宙密度が臨界密度の 2 倍以上ではありえないことを示した．この結果は，3 種類のニュートリノ質量の合計が 100 eV を越えてはならないと結論する．

しかし，ニュートリノが 150 億年あるいはそれ以上の長い寿命を持たないとしたら，どうなるだろうか？ 例えば，我々は電子ニュートリノが少なくとも 500,000 秒(約 6 日)以上の寿命を持っていることを知っている．もしそうでなければ，超新星 SN1987A の出現に伴うニュートリノは，ここ地球上で検出されないはずだ．しかし，この値はビッグバン以後の時間に比べて余りにも短い．他の種類のニュートリノの寿命はどうか？ いずれにせよ，もしニュートリノが崩壊するならその崩壊先がなんであれ，崩壊によってもたら

される全ての影響を考慮しなければならないことが問題になる．それはエネルギー保存則によって，ニュートリノが単に消えてしまうことが許されないためである．

これまでの多くの実験において，ニュートリノが光子に崩壊する証拠は見つかっていない．宇宙で元素合成が始まった時期，すなわち宇宙が光子に対して透明になった時期のそれ以降に，光子に崩壊する宇宙背景ニュートリノはマイクロ波背景輻射よりも多くの輻射を残すことになるが，そのような量の輻射は検出されていない．逆に元素合成以前にニュートリノが光子に崩壊する場合は，背景輻射のエネルギー分布の形状に変化を与えることが考えられるが，そのような効果も検出されていない．超新星爆発の際に放出されたニュートリノが光子に崩壊すれば，高エネルギー光子を背後に伴うことが予想されるが，観測されなかった．

このような予想される現象が観測される，または観測されない場合のそれぞれにおいて，ニュートリノが光子に崩壊することを可能にするニュートリノの質量と寿命を組み合わせた量に制限が加えられる．ニュートリノがもっと違った崩壊の仕方をすることも考えられるが，これまでの諸々の観測量と矛盾しないような理論を作ろうとすると，ほとんどいつものことではあるが，素粒子物理学の標準理論の枠組みを越えるなんらかの仕組みを必要とする．その上，現在の宇宙のエネルギー密度が観測結果と等しく，それを越えないことを保証するような理論は，仮にニュートリノが全く想像もできないような方法で崩壊したとしても，その時のニュートリノの質量と寿命を組合せた量を完全に排除する．

宇宙暗黒物質候補：ニュートリノ

現在，提案されている数多くの暗黒物質候補の粒子の中で，唯一，ニュートリノのみが実在する粒子である．とは言え，ニュートリノが質量を持つかどうかは誰も知らない．質量を持つべきなのだが．[36]

グラシエラ・ゲルミニ，1988 年

背景ニュートリノのエネルギー密度と密接に関係している宇宙論の問題の

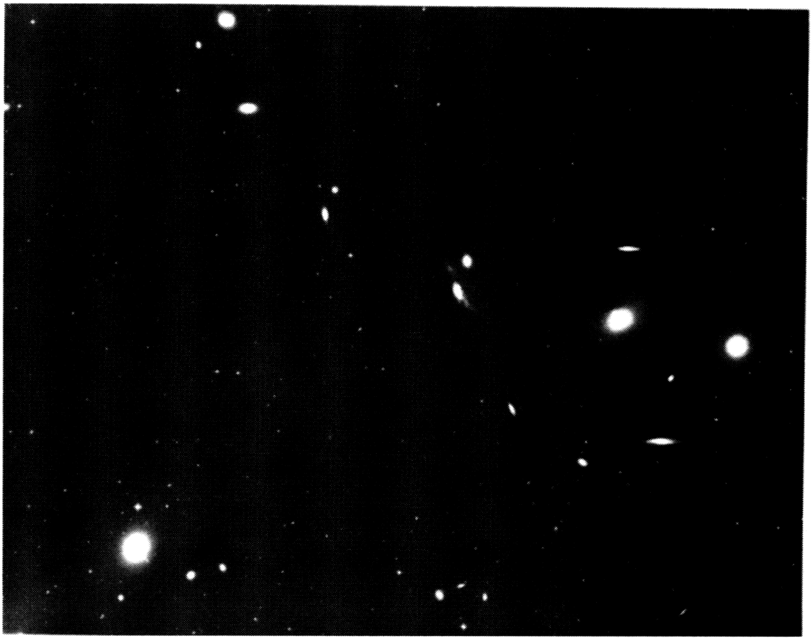
一つは，“見えない”質量または“暗黒物質”の謎である．この暗黒物質は，2つの異なる宇宙論の議論の中に登場する．その一つは，天体物理学者が渦状銀河の動力学的観測から帰結した，銀河内で観測される光り輝く物質は，銀河の全質量の約10%に過ぎないことに関連する．これらの銀河の中にある星やガスの軌道回転速度を説明するには，銀河は観測される円盤よりも，少なくともさらに10倍は広がっている球状あるいは，ハロー状の光を発しない物質によって取り囲まれていなければならない．

光り輝く物質自身のエネルギー密度は，臨界密度の約1%にあたる．これに，銀河に付着する暗黒物質を考慮すると，臨界密度の10%まで説明できる．銀河の超クラスターの運動に関する同じような力学的考察により，さらなる暗黒物質が必要になり，宇宙の全エネルギー密度は臨界密度の20%に達するものと推定される．

驚くべきことに，この値は臨界密度に100%近づくことが以下のことから推測される．そして，このことは宇宙論学者を悩ませる原因となった．膨張宇宙において，もちろん臨界密度を大きく越えることができないとはいえ，エネルギー密度は過去ほど大きいはずである．もし，臨界密度の20%の値を持つ現在のエネルギー密度を，時間をさかのぼって過去へ外挿すると，宇宙初期のエネルギー密度は臨界密度にほぼ一致しなければならいことがわかる．それは臨界密度と50桁以内の精度で一致している．

宇宙論学者が宇宙始まりの微調整と呼ぶこのような必然性を持って宇宙が誕生したことは，不自然に見える．議論の余地が大いにあるが，宇宙が臨界密度に一致するエネルギー密度で生まれ，現在もその値を保持していることを仮定せざるを得ない．

さらに，現在，多くの研究者が支持しているインフレーション宇宙論と呼ばれているビッグバン理論の改訂版は，宇宙が臨界密度を持つべしと規定する．インフレーション宇宙は，宇宙誕生直後に関する多くの問題を解決することから，宇宙論学者を大いに魅了する理論である．私はこの理論をこれから詳しく紹介することはしない．ただ，宇宙のエネルギー密度が正確に臨界密度と一致すると確信させてくれるだけで十分である．しかし，それでも我々が観測できるのは宇宙の全物質の高々1%のみという事実は，謎として残っている．その他の99%は観測にかからない暗黒物質である．その正体はいった



ここで示されている乙女座銀河団のような銀河団の運動学的測定は，見えない物質＝暗黒物質の存在に対する証拠を提供する．暗黒物質の効果は，重力相互作用を通してのみ検出される．(王立エジンバラ天文台)

い何か？

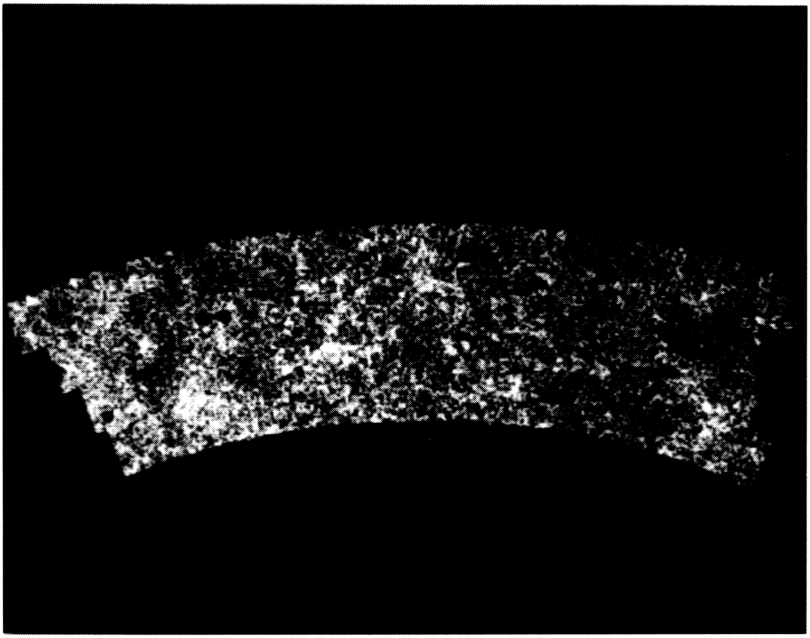
このことに関して，さまざまな可能性が議論された．そして，多くの仮想的粒子が導入された．実際のところは，複数の異なる見えない物質候補の組み合わせであろうと考えられている．また過去10年の間に，たびたび議論の舞台に登場した暗黒物質候補の一つがニュートリノであった．

以前に説明したように，ニュートリノの質量が約30eVで安定なら，宇宙初期に作られ現在に至るまで残存するニュートリノのエネルギー密度は，臨界密度に匹敵する．しかし，暗黒物質問題に対するこの解には，困難が立ちはだかる．それは，宇宙が進化するにつれて銀河のスケールよりもはるかに巨大なスケールで，まず物質が互いに集まってクラスターを作り，銀河がその後で，つまり実際よりもずっと遅い時期に形成されることが明らかになったためである．しかし，1980年代に入ると天文学者は，宇宙において莫大な

数の銀河に相当するスケールの巨大構造の存在を裏付ける数々の証拠を見つけた．さらに，宇宙論学者は質量の軽いニュートリノが支配する宇宙で，銀河形成がもっと早期に起こるシナリオを考え出した．ここで再び，ニュートリノが暗黒物質候補の主役になった．

例えばタウニュートリノが 1 keV 程度の質量を持ちかつ不安定なら，暗黒物質がタウニュートリノである可能性は十分考えられる．しかし，この場合，前と同様の問題，すなわち宇宙進化の過程における銀河形成がもっと厄介になる．そして，現在の宇宙を実現するような理論を構築することに成功したものは誰もいない．他の暗黒物質候補として，まだ未発見で少なくとも陽子と同程度の質量を持つニュートリノに似た粒子がある．このような新しい種類の重いニュートリノの存在は，宇宙創成から 3 分間で生成されたヘリウム 4 の生成量のデータによって完全には排除されない．なぜなら，このデータからの制約は，ニュートリノ質量が 25 MeV 以下であることを要求するのみであるから．また，このような重いニュートリノを暗黒物質とする考えは，最初に銀河スケールにおいて物質を凝集させようとする力が働くために，宇宙における銀河形成になんら困難な問題を提起しない．銀河形成のすぐ後で，銀河団，超銀河団が出現する．しかしながら，このようなニュートリノは，中性 Z 中間子の崩壊で検出されるべきで，中性 Z 中間子の寿命の測定に影響を与えるはずであるが，CERN における実験結果（第 4 章）は，重いニュートリノの存在の可能性を否定しているかに見える．

宇宙における暗黒物質の存在は，最小限，銀河の回転運動を説明するのに必要であることから，疑う余地はない．そして暗黒物質の正体は 20 世紀後半の最も重要な科学の謎の一つである．この重要性は観測的天文学の領域を越えて宇宙論や素粒子物理学にまで及んでいる．この状況は，これまで原子や宇宙のように大きさのスケールがまったく異なり，無関係であるように思われた研究が，実は密接にかかわりあっていたと要約することができる．暗黒物質の正体の解明は，21 世紀の最初の大きな科学の偉業の一つになるだろう．そして，パウリがしぶしぶ導入したニュートリノが，我々の住む世界＝宇宙の形成に目に見えない役割を演じているのかどうか，我々はその答えをつかむだろう．



このモザイク化模様は，英国のシュミット望遠鏡で観測し，エジンバラとダーラム天文台でカタログ化された銀河座標の南極方向にある 8 万の暗い銀河の分布を表している．各銀河は天空に一様に分布しているのではなく，場所，場所で局在化し，それによって，所々に銀河の空隙パターンが見られる．このような銀河分布の不規則性は，宇宙に充満する宇宙背景マイクロ波の一様性と合致しない．むしろ，大量の暗黒物質が宇宙に存在する場合の理論によって，容易に説明できる．(王立エジンバラ天文台)

第 8 章

ニュートリノ月面観測基地

これからの私の夢を語ろう.[1]

小柴昌俊, 1987 年

パウリが原子核のベータ崩壊現象に潜む難題に, 絶望的な解決策を躊躇しながらも提案してから今や 60 年以上, そして, ライネスとコーワンが開拓精神旺盛にして挑んだニュートリノ検出実験から 40 年が経っている. 素粒子加速器が生み出すニュートリノ・ビームを最初に用いた実験で, ミュー・ニュートリノの存在が実証されてから 30 年, そして, 太陽ニュートリノが初めて検出されてから 20 年が過ぎた. 多くの科学上の展開が一段落する歳月の中で, ニュートリノ研究はそれ自身の正体不明さゆえに, その進展具合は著しくのろかった. 少なくともニュートリノの実験的研究を推進するには, 並外れた忍耐力と集中力が要求された. そして, 想像力も.

この本を通して私達は, なんどもニュートリノに関する実験がその技術を極限にまで高めたことを見てきた. これは, 純粋科学の研究が果たす良い伝統の一つである. しかし, ニュートリノ研究の報いがゆっくりと訪れる反面, それらは大魚とでも言うべき成果であった. 電磁気力と弱い力が一つの基本的な力の異なる側面であるという最初の証拠, 陽子と中性子の内部にクォークとグルーオンが存在していることの確証, II 型超新星に分類される星の進化の終焉を記述する理論の紛れもない立証など, これらの成功は全て獲物を追い求めるように難しい実験をやりとおす決意と, 不可能を可能にするよう

な夢を描く能力との産物であった.

この最終章で，私はニュートリノが物理学者を奮い立たせ続けるような夢，すなわち現段階では非現実的に見えるかもしれないが，21世紀にはそのうちの幾つかが実現されるような夢について紹介しよう.

私はこの章の冒頭で，超新星SN1987Aの劇的な観測によって開花した“観測的ニュートリノ天文学”について，小柴が1987年に書いた論文の中にある言葉を引用した．小柴の実験であるカミオカンデは，超新星からのニュートリノを検出しただけではなく，太陽方向の特定が可能なニュートリノ反応の実時間測定法を用いた太陽ニュートリノ検出に成功した．1991年春に，この水チェレンコフ検出器の拡大版である，スーパーカミオカンデ・プロジェクトが承認された．スーパーカミオカンデは，太陽中心部の温度を1週間の観測によって1%の精度で監視することができるという，十分な量の太陽ニュートリノ検出が可能である.

しかし，1987年の論文の中で小柴はすでにもっと先に目を向け，同じタイプであるが時間特性の優れたスーパーニュートリノ観測所を世界規模に設置するネットワーク構想を抱いていた．小柴によれば，この計画では太陽中心温度の毎日の変化が1%の精度でわかる．さらに，これらの検出器群は超新星爆発に伴うニュートリノ・バーストを最初の光情報より十分先んじて測定できるため，超新星爆発の早期監視システムの役割を果たすだろう．また，小柴は全天球を常時監視する目的で，世界中の湖に高エネルギー・宇宙ニュートリノ検出器を設置する同様のネットワーク構想を描いた.

少し違った夢に触発されて，フランシス・ハルツェンとアメリカにいる彼の同僚達は，超高エネルギー・宇宙ニュートリノ研究の展開に有望と思える実験方法の検討を始めた．彼らは深水下検出器で使用されるニュートリノ標的媒質の安価さと，大深度地下にある検出器の力学的安定性とを兼ね備える検出器を考察した．このような検出器とは，ミューオンが水の中を走行する時に発するチェレンコフ光を，水ではなく南極の厚い氷の媒質を用いて捕らえる検出器である．実験チームは既にグリーンランドの北極の氷でテストを済ませた．そして1990年8月には，短いワイヤーに3本の光電子増倍管を取付けた装置でミューオンの検出に成功した．このワイヤーは，地表面下約200mにある硬く固まった100mほどの雪層にボーリングであけられた竪穴

に吊るされた注1.

超高エネルギー・ニュートリノを検出するために氷を使う別の方法が，モスクワ科学アカデミーのI. M. ゼルゼニク達によって検討されている．彼らは，高エネルギー・ニュートリノ反応によって生成された荷電粒子群全体の特性を検出する目的で，チェレンコフ効果によって生じるラジオ波を探知することを計画している．(多くの荷電粒子群は，ラジオ波を放出する小さな動力源として機能する.）Radio Antarctic Muon and Neutrino Detector の略である RAMAND において，地表面に設置されるラジオ波アンテナは氷の中のニュートリノ反応を発生源とするラジオ波の信号を検出する．

小柴とハルツェン，ゼルゼニクおよび彼らの共同研究者達は，地球上でのニュートリノ天文学が直面する限界を凌駕しようと夢を膨らませた．しかし，他方，夢を地球の外で実現しようと考える人達がいた．例えば，1965 年の昔，ライネスは宇宙ニュートリノの検出に月がより好都合であることに気づいていた．

宇宙ニュートリノ研究を難しくする主な要因は，大気上層部での宇宙線荷電粒子の反応から生じるニュートリノ（大気ニュートリノ）がバックグランドとして混入することによる．特に，これらの反応で作られる荷電パイ中間子や荷電 K 中間子が崩壊する時に，ニュートリノが生成される．10^{12} 電子ボルト以上の超高エネルギーになると，バックグランドの混入は幾分減ってくる．それは時間の伸長効果（第 4 章参照）によってニュートリノの生みの親である荷電中間子の寿命が延びるため，崩壊する前に大気と反応を起こす頻度が高くなるためである．この理由から DUMAND のような実験装置は，約 10^{12} 電子ボルト以上のエネルギーを持つニュートリノに対してのみ有効である．しかし，このようなエネルギーの高い宇宙ニュートリノの数は少なく，実験装置はめったに起きない現象を辛抱強くじっと待たなければならない．そのため，大気ニュートリノを除外することは明らかに大きな利点になる．つまり，大気をなくすのである！

注1 フランシス・ハルツェンが率いる南極点からほぼ 1 km 脇の地下 1.5 km～2 km の間に，677 本の光電子増倍管を配置した実験装置（AMANDA）は，2000 年に完成し実験を開始した．2000 年～2003 年の間に 3369 の上向きミュー粒子を検出したが，超高エネルギー・ニュートリノ点源は見つかっていない．

それでは，月でのニュートリノ実験とはどんなものになるのか．実験は月の土壌または岩盤の地下で行われる．それは，地球上での大気のように一次宇宙線を吸収する層の役目が必要となるからである．岩盤は荷電パイ中間子や荷電K中間子が崩壊する前に，これらを吸収するに十分な密度を有している．そのため，この防護覆いはそれ自身でニュートリノの発生源にはならないだろう．月面下10mほどにある自然の洞窟や溶岩窟は，その岩盤によって宇宙放射線や隕石を遮蔽し，そこに従事する人達の安全を確保する天然の砦を提供する．このため将来の人工月面観測基地の有望な場所としてすでに検討されている．このような巨大な洞窟はニュートリノ望遠鏡にふさわしい．

メリーランド大学のモーリス・シャピロとワシントン州海軍研究所のレイン・シルバーバーグは，月面ニュートリノ望遠鏡の利点に特に着目した研究者であった．彼らは10^9〜10^{12}電子ボルトのエネルギーを持つ宇宙ニュートリノの検出が，最も有効であると指摘している．このエネルギー領域での1個のニュートリノの反応確率は，10^{12}電子ボルト以上のエネルギーに比べて小さいとはいえ，低いエネルギー領域の宇宙ニュートリノの数が多いと予想されるため検出率ではまさる．一方，地球上ではこのエネルギー領域の宇宙ニュートリノは，大気ニュートリノのバックグランドに埋もれて検出不可能である．

シャピロとシルバーバーグは，月面観測基地によって新たに展開されるニュートリノ研究を次のように強調している．一つは，我々の銀河中心のような10^9〜10^{12}電子ボルトのエネルギー領域を持ち，広範囲に分布するニュートリノ源からやってくるニュートリノ検出である．もう一つは，DUMANDや同様の地上の実験装置で検出できないくらい弱いが，充分存在の知れた活動天体の点源からやってくるニュートリノの検出である．もう一つの可能性として，太陽フレアーの中で発生した高エネルギー・ニュートリノの検出もある．太陽フレアーとは宇宙飛行士に放射線障害を及ぼす大量の荷電粒子群を，宇宙空間にまき散らす太陽表面の噴火である．太陽フレアー・ニュートリノの測定は，特に地球に対して反対の太陽表面でフレアーが起こった場合に，早期警告の手段を提供するだろう．

ルイジアナ州立大学のマイケル・チェリーは，“この夢が21世紀に実現されることは疑う余地もない”と述べている．月全体は宇宙ニュートリノに対

して標的物質の役目を果たす．しかし，ニュートリノ反応で生じたミュー粒子を測定する装置は，地球から持ち込んだ物資で組み立てられることになる．現在，検討中の最も軽重量の検出器でさえも，200 トンもの物資を月に輸送しなければばならない．

地球上に話を戻そう．別の物理学者は天体物理学ではなく，地球物理学におけるニュートリノの役割を考察した．地球そのものは放射性物質を含み，これらの放射性物質中の不安定原子核が自発的にベータ崩壊を起こす際に反ニュートリノを放出することから，反ニュートリノ源である．地表から 1000 km の深さまでの岩石圏においても，主としてウラン 238，トリウム 232，ルビジウム 87，カリウム 40 の崩壊により，全体として地表面から 1 平方 cm 当たり毎秒約 600 万個の反ニュートリノを放出していると考えられている．この反ニュートリノの数は多いように思えるかもしれないが，絶え間なく地球に降り注ぐ太陽ニュートリノの数の 1 万分の 1 である．ニュートリノを手段とする地球物理学の実験は，太陽ニュートリノ検出のために設計された実験装置の 1 万倍も高精度の検出器を必要とする．一見してこれは不可能な業に見えるが，夢を打ち砕くほどのものではない[注 2]．

もし，地球起源反ニュートリノ検出に十分な能力を持つ高精度の検出器が実現できたとしよう？ そのデータはあなたになにを教えてくれるのか？ 理論物理学者のローレンス・クラウス，シェルダン・グラショウとデビッド・シュラムは，反ニュートリノがもたらしてくれる地球物理学上の比類ない知見を入念に調べ，それを 1984 年のネイチャー誌に発表した．これらの捕まえにくい粒子が持つ特徴の一つは，非常に大きな透過力である．そのため，測定結果は他のいろんな手段で研究可能な地球の表層部にとどまらず，地球内部全体の状態を映し出してくれるだろう．

1 秒間に放出される反ニュートリノの総数は，地球内部にある全放射能に依存する量であり，その結果，放射性物質の崩壊によって産出されるエネルギー量を与えてくれる．他方，ある放射性物質から放出される反ニュートリノはその物質に特有のエネルギー分布を持つため，それぞれのエネルギー領

注 2　2005 年 7 月，カムランド（第 6 章注 9 参照）は 749 日間のデータを解析し，25 個の地球起源反ニュートリノの初検出に成功した．これによってニュートリノを手段とする地球内部探査の道が開けた．

域で反ニュートリノを測定すると各種の放射性物質のエネルギー量への寄与が求まり，地球内部のさまざまな運動形態を調べる探求の窓を提供する．例えば，地球全体のルビジウム 87 の量を調べ，他の手段で得られた表層部の量と比較することによって，地表下 700 km のマントル領域に存在する対流の挙動を理解することに役に立つ．

地球物理学における反ニュートリノのもう一つの役割は，1974 年にジョージ・ザセピンと L.V. ボルコゥバによって最初に提案された．それは，X 線が人体内の密度変化を表示するように，加速器で作られる高エネルギー・ニュートリノのビームを用いて，地球内部の密度分布を調べることである．要は，地表下の全角度にニュートリノ・ビームを振り向け，反対側の地表面から飛び出てくるニュートリノを測定する．

しかしながら，ヒューストンにある NASA のリンドン・ジョンソン宇宙センターのトーマス・ウィルソンが 1984 年のネイチャー誌に強調しているように，全人体の X 線スキャナーのように機能的な役割を演じるには，ニュートリノ発生源と検出器が共に地上を移動できるようなシステムが必要である．発生源に巨大粒子加速器を使い，検出器に DUMAND のようなものを用いることはほとんど現実的ではない．代替案となるのは，天体源からくるニュートリノを観測する検出器の地球規模のネットワーク化を実現することであろう．地球の回転は，天体源が対象物体である地球の周りを回ることを保証し，一方，検出器ネットワークは，一台の装置が仮想的に移動することと同等である．おそらく，非常に強い高エネルギー・ニュートリノ源がいつか発見されたら，このことは，小柴が提案した世界規模の湖水検出器ネットワークにとって一つの研究対象になるだろう．

以上の 2〜3 の例から明らかなことは，未来はニュートリノを用いて，過去と同じような興奮を与えるいろんな出来事が起こると予想される．60 年以上の間，ニュートリノは原子の中のもっとも小さな構造から宇宙の大規模な振る舞いに渡って興味を抱く物理学者を悩ませ，興味をそそり，希望をくじき，そして驚きを与えてきた．ニュートリノはほとんどなんの個性もないがそれゆえに意義がある．すでに，我々が宇宙の基本物理過程の数々の段階，状態を理解する上で，計り知れず重要であることが示された．ニュートリノは宇宙の絶対的な支配者ではないかもしれないが，それらは，確かにもっとも魅

力的な現存する“宇宙飛行船”として位置づけられだろう．私はあなた方が，宇宙飛行船と一緒の旅を楽しんでいただけたものと願っている．

引用文献

第1章

1. H. Harari, *Proc. 13th Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Boston (Medford), June 5–11, 1988*, p. 574. © World Scientific Publishing Company.

第2章

1. B. Pontecorvo, 'Proc. Int. Colloqium on the History of Particle Physics', *J. de Phys.* 43, suppl. C8, 221, 1982.
2. W. Pauli in a letter to L. Meitner *et al,* reproduced in the original German in *Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli* (Wiley Interscience, New York, 1964), vol 2, ed. R. Kronig and V.F. Weisskopf, p. 1316. This translation is from *Inward Bound* (Oxford University Press, Oxford, 1986), by A. Pais, p. 315, and is reproduced here by permission of Oxford University Press.
3. W. Pauli, *ibid.*
4. E. Rutherford in a letter to O. Hahn, reproduced in *Rutherford* (Cambridge University Press, Cambridge, 1939), by A.S. Eve, p. 207.
5. E. Rutherford and H. Geiger, *Proc. Roy. Soc.* A81, 162, 1908.
6. L. Meitner, *Bull. At. Sci.* p. 2, November 1964. Reprinted by permission of the *Bulletin of the Atomic Scientists,* a magazine of science and world affairs; © 1964 by the Educational Foundation for Nuclear Science, 6042 South Kimbark Avenue, Chicago, IL 60637, USA.
7. L. Meitner, *ibid.*
8. J. Chadwick in a letter to E. Rutherford, Cambridge University Manuscript Collection, reproduced with permission of the Syndics of the University Library, Cambridge.
9. C.D. Ellis and W.A. Wooster, *Proc. Roy. Soc.* A117, 109, 1928.
10. B. Russell, *The ABC of Atoms* (Kegan Paul, Trench, Trubner & Co, London, 1923), p. 142.

11. N. Bohr in a letter to R.H. Fowler reproduced in *Niels Bohr – Collected Works* (North Holland, Amsterdam, 1986), vol 9, ed. R. Peirels, p. 555.
12. N. Bohr, *J. Chem. Soc.* 135, 349, 1932.
13. N. Bohr, *ibid.*
14. N. Bohr, *ibid.*
15. N. Bohr, *ibid.*
16. N. Bohr, *ibid.*
17. W. Pauli, remarks at the Seventh Solvay Conference October 1933, reproduced in the original French in *Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli* (Wiley Interscience, New York, 1964), vol 2, ed. R. Kronig and V.F. Weisskopf, p. 1319.
18. N. Bohr in a letter to W. Pauli reproduced and translated in *Niels Bohr – Collected Works* (North Holland, Amsterdam, 1986), vol 6, ed. U. Hoyer, p. 443.
19. W. Pauli in a letter to N. Bohr reproduced and translated in *Niels Bohr – Collected Works* (North Holland, Amsterdam, 1986), vol 6, ed. U. Hoyer, p. 446.
20. W. Pauli, see Ref. 2.
21. J. Chadwick, *Proc. Roy. Soc.* **A136**, 692, 1932.
22. J. Chadwick, reprinted by permission from *Nature* **129**, 312, 1932, © 1932 Macmillan Magazines Ltd.
23. J. Chadwick, *ibid.*
24. D. Iwanenko, *Comptes Rendus* **195**, 439, 1932.
25. P.A.M. Dirac in *The Birth of Particle Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983), ed. L.M. Brown and L. Hoddeson, p. 49.
26. D. Iwanenko, see Ref. 24.
27. P.A.M. Dirac, see Ref. 25.
28. N. Bohr in a letter to F. Bloch reproduced and translated in *Niels Bohr – Collected Works* (North Holland, Amsterdam 1986), vol 9, ed. R. Peierls, p. 541.
29. D. Iwanenko, see Ref. 24.
30. F. Perrin, *Comptes Rendus* **197**, 625, 1933.
31. E. Fermi in *Z. für Physik* **88**, 161, 1934. This translation reprinted with permission from *The Theory of Beta Decay* by C. Strachan, p. 107, © 1969, Pergamon Press plc.
32. E. Fermi, *ibid.*
33. E. Fermi, *ibid.*

第3章

1. H.R. Crane, *Rev. Mod. Phys.* **20**, 278, 1948.
2. R. Peierls, *Contemporary Physics* **24**, 221, 1983.
3. R. Peierls, *ibid.*
4. A.S. Eddington, *The Philosophy of Physical Science* (Cambridge University Press, Cambridge 1939), p. 112.
5. F. Reines, 'Proc. Int. Colloqium on the History of Particle Physics', *J. de Phys.* **43**, suppl. C8, 237, 1982.
6. F. Reines, *ibid.*
7. F. Reines, *ibid.*
8. F. Reines, *ibid.*
9. F. Reines, *ibid.*
10. F. Reines and C.L. Cowan, *Phys. Rev.* **92**, 830, 1953.
11. F. Reines, see Ref. 5.
12. F. Reines, *ibid.*
13. C.N. Yang, Nobel Lecture, 11 December, 1957. © The Nobel Foundation 1958.
14. C.N. Yang, *ibid.*
15. T.D. Lee and C.N. Yang, *Phys. Rev.* **104**, 254, 1956.
16. T.D. Lee and C.N. Yang, *ibid.*

17. T.D. Lee, unpublished.
18. T.D. Lee, unpublished.
19. W. Pauli, in a letter to V.F. Weisskopf, reproduced and translated in *Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli* (Wiley Interscience, New York, 1964), vol 1, ed. R. Kronig and V.F. Weisskopf, p. xiii.
20. A. Salam, *Imperial College Inaugural Lectures (1956–7, 1957–8)*, p. 54.
21. A. Salam, Nobel Lecture, 8 December 1979. © The Nobel Foundation 1980.
22. A. Salam, *ibid.*
23. A. Salam, *ibid.*
24. A. Salam, *ibid.*
25. M. Goldhaber, *1958 Ann. Int. Conf. on High Energy Physics at CERN* (CERN, Geneva, 1958), p. 233.
26. J.L. Vuilleumier, *Rep. Prog. Phys.* **49**, 1293, 1986.
27. W. Pauli in a letter to L. Meitner *et al*, reproduced in the original German in *Collected Scientific Papers by Wolfgang Pauli* (Wiley Interscience, New York, 1964), vol 2, ed. R. Kronig and V.F. Weisskopf, p. 1316. This translation is from *Inward Bound* (Oxford University Press, Oxford, 1986), by A. Pais, p. 315, and is reproduced here by permission of Oxford University Press.
28. E. Fermi in *Z. für Physik* **88**, 161, 1934. This translation reprinted with permission from *The Theory of Beta Decay* by C. Strachan, p. 107, © 1969, Pergamon Press plc.
29. J.L. Vuilleumier, see Ref. 27.
30. M. Fritschi *et al*, *Phys. Lett.* **B173**, 485, 1986.
31. M. Fritishi *et al*, *ibid.*
32. S. Boris *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2019, 1987.
33. J.F. Wilkerson *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2023, 1987.
34. B. Pontecorvo, 'Proc. Int. Colloquium on the History of Particle Physics', *J. de Phys.* **43**, suppl. C8, 221, 1982.
35. E. Fermi, quoted by B. Pontecorvo in Ref. 36.
36. E. Majorana, *Nuo. Cim.* **5**, 171, 1937, as translated by B. Pontecorvo in Ref. 36.
37. E. Majorana, *ibid.*
38. B. Pontecorvo, see Ref. 36.
39. B. Pontecorvo, *ibid.*
40. J. Bernstein, *Neutrino Cosmology*, CERN report 84-06 (CERN, Geneva, 1984), p. 7.

第4章

1. C.D. Anderson in *The Birth of Particle Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1983), ed. L.M. Brown and L. Hoddeson, p. 146.
2. H. Yukawa, *Tabibito* (World Scientific, Singapore, 1982), p. 190.
3. H. Yukawa, *ibid* pp. 194 and 195.
4. H. Yukawa, *ibid* p. 202.
5. H. Yukawa, *ibid* p. 203.
6. L. Lederman, *Scientific American*, March 1963, p. 60.
7. B. Pontecorvo, 'Proc. Int. Colloquium on the History of Particle Physics', *J. de Phys*, **43**, suppl. C8, 221, 1982.
8. B. Pontecorvo, *ibid.*
9. B. Pontecorvo, *ibid.*
10. F. Reines, 'Proc. Int. Colloquium on the History of Particle Physics', *J. de Phys.* **43**, suppl. C8, 237, 1982.
11. M. Schwartz, *Adventures in Experimental Physics*, (World Science Communications, New Jersey, 1972), vol α, ed B. Maglich, p. 82.
12. L.M. Lederman, *Proc. Int. Conf. on Instrumentation for High-Energy Physics* (University of California, Berkeley, 1961), p. 201.

13. L.M. Lederman, *Fermilab Report*, October 1988, p. 3.
14. G. Danby *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **9**, 36, 1962.
15. M.L. Perl, *The Science Teacher*, December 1980, p. 16. © 1980, National Science Teachers Association.
16. M.L. Perl, *ibid.*
17. S. Weinberg, *Int. J. Mod. Phys. A* **2**, 301, 1987. © World Scientific Publishing Company.
18. J. Bernstein, *Neutrino Cosmology*, CERN report 84–06 (CERN, Geneva, 1984), p. 23.
19. M. Goldhaber, *Neutrinos – 1974* (American Institute of Physics, New York, 1974), AIP Conf. Proc. No. 22, p.1.
20. A. Pais in *Inward Bound* (Oxford University Press, Oxford, 1986), p. 521.
21. F. Halzen and K. Mursula, *Phys. Rev. Lett.* 51, 857, 1983.

第5章

1. L.M. Lederman, *High Energy Physics* (Academic Press, New York, 1967), vol II, ed. E.H.S. Burhop, p. 303.
2. C.A. Ramm, *CERN Courier* **6**, 211, 1966.
3. B.C. Barish, *Scientific American*, August 1973, p. 30.
4. A. Rousset, in a talk at the Centre d'Orsay de l'Université de Paris Sud, 12 March 1975, transcribed in *Hommage à André Lagarrigue*, p. 13.
5. P. Musset, in a talk at the Int. Colloq. on High Energy Neutrino Physics at the Ecole Polytechnique on 20 March 1975, transcribed in *Hommage à André Lagarrigue*, p. 35.
6. P. Musset, *ibid.*
7. *CERN Courier* **10**, 382, 1970.
8. D.H. Perkins, *Proc. 1973 School for Young High Energy Physicists*, Rutherford Laboratory report 74–38, p. vi–1. © SERC 1974.
9. S. Coleman, *Science* **206**, 1290, 1979. © 1979 by the AAAS.
10. S. Weinberg, Nobel Lecture, 8 December 1979. © The Nobel Foundation 1980.
11. S. Weinberg, *ibid.*
12. A. Salam, Nobel Lecture, 8 December 1979. © The Nobel Foundation 1980.
13. A. Rousset, *Neutrinos – 1974* (American Institute of Physics, New York, 1974), AIP Conf. Proc. No. 22, p. 141.
14. D.H. Perkins, *Proc. 1974 CERN School of Physics*, CERN report 74–22 (CERN, Geneva, 1974) p. 180.
15. R.P. Feynman, *Neutrinos – 1974* (American Institute of Physics, New York, 1974), AIP Conf. Proc. No. 22, p. 300.
16. W.K.H. Panofsky, *Proc. 14th Int. Conf. on High-Energy Physics* (CERN, Geneva, 1968), p. 23.
17. J. Bjorken, *Proc. Int. School of Physics 'Enrico Fermi', Course XLI* (Academic Press, New York and London, 1968), p. 55. © 1968 Societa Italiana di Fisica.
18. R.P. Feynman, *Science* **183**, 601, 1974. © 1974 by the AAAS.
19. R.P. Feynman, *Proc. 5th Hawaii Topical Conf. in Particle Physics*, p. 3. © 1974 by the University Press of Hawaii, Honolulu.
20. R.P. Feynman, see Ref. 18.
21. R.P. Feynman, *ibid.*
22. J. Steinberger, *Proc. 12th SLAC Summer Inst. on Particle Physics, June 1981: The Sixth Quark – Pief Fest*, SLAC report 281, p. 691.
23. J. Steinberger, *ibid.*
24. D.H. Perkins, *Introduction to High Energy Physics* (2nd edition), p. 275. © 1982 Addison-Wesley Publishing Co. Inc., Reading, Massachusetts. Reprinted with permission of the publisher.
25. P.V. Landshoff, *Proc. 1974 CERN School of Physics*, CERN report 74–22

(CERN, Geneva, 1974), p. 123.
26. R.P. Feynman, see Ref. 15.
27. D.H. Perkins, *Proc. 5th Hawaii Topical Conf. in Particle Physics*, p. 507. © 1974 by the University Press of Hawaii, Honolulu.
28. D.H. Perkins, see Ref. 14.
29. R.P. Feynman, see Ref. 18.
30. R.P. Feynman, see Ref. 15.
31. D.H. Perkins, see Ref. 24, p. 272.

第6章

1. P. Morrison, *Scientific American*, August 1962, p. 91.
2. A.S. Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge University Press, Cambridge, 1929), p. 165.
3. H.A. Bethe, *The Sciences*, October 1980, p. 6.
4. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, *Essays in Nuclear Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge 1982), ed. C.A. Barnes, D.D. Clayton and D. Schramm, p. 243, also reproduced in *Neutrino Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1989) by J.N. Bahcall, p. 487.
5. F. Reines, reproduced, with permission, from the *Annual Review of Nuclear Science*, vol. 10, p. 1, © 1960 by Annual Reviews Inc.
6. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, see Ref. 4.
7. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, *ibid.*
8. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, *ibid.*
9. J.N. Bahcall, *Scientific American*, July 1969, p. 29.
10. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, see Ref. 4.
11. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, *ibid.*
12. J.N. Bahcall and R. Davis Jr, *ibid.*
13. L. Wolfenstein and E.W. Beier, *Physics Today*, July 1989, p. 28.
14. K.S. Hirata *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 1297, 1990.
15. J.N. Bahcall, reprinted by permission from *Nature* **330**, 318, 1987. © 1987 Macmillan Magazines Ltd.
16. P. Rosen, *'86 Massive Neutrinos: Sixth Moriond Workshop of XXIst Rencontres de Moriond* (Editions Frontieres, Gif-sur-Yvette, 1986), ed. J. Tran Thanh Van, p. 25.
17. J.N. Bahcall, *Neutrino Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1989), p. 31.
18. L. Wolfenstein and E.W. Beier, see Ref. 13.
19. J.N. Bahcall, see Ref. 17.
20. H.H. Chen, *Phys. Rev. Lett.* **55**, 1534, 1985.
21. S. Weinberg, *Int. J. Mod. Phys. A* **2**, 301, 1987. © World Scientific Publishing Company.
22. N.E. Booth *et al*, *Solar Neutrinos and Neutrino Astronomy* (American Institute of Physics, New York, 1984), AIP Conf. Proc. No. 126, p. 216.

第7章

1. S.E. Woosley and M.M. Phillips, *Science* **240**, 750, 1988. © 1988 by the AAAS.
2. R. Jedrzejewski quoted by R.A. Schorn in *Sky & Telescope*, May 1987, p. 470.
3. R. Jedrzejewski, *ibid.*
4. S.E. Woosley and T. Weaver, *Scientific American*, August 1989, p. 24.
5. S.E. Woosley and T. Weaver, *ibid.*
6. A. Burrows, *Physics Today*, September 1987, p. 28.
7. S.E. Woosley and T. Weaver, see Ref. 4.

8. A. Burrows, *Proc. 13th Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Boston (Medford), June 5–11, 1988*, p. 142. © World Scientific Publishing Company.
9. R.M. Bionta *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1494, 1987.
10. K. Hirata *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 1490, 1987.
11. S.E. Woosley and T. Weaver, see Ref. 4.
12. A. Burrows, see Ref. 8.
13. L.B. Okun, *Proc. 13th Int. Conf. on Neutrino Physics and Astrophysics, Boston (Medford), June 5–11, 1988*, p. 828. © World Scientific Publishing Company.
14. L.B. Okun, *ibid.*
15. L.B. Okun, *ibid.*
16. K. Greisen, *Proc. Int. Conf. on Instrumentation for High-Energy Physics* (University of California, Berkeley, 1961), p. 209.
17. F. Reines and J.P.F. Sellschop, *Scientific American*, February 1966, p. 40.
18. K. Greisen, see Ref. 16.
19. M.A. Markov, *Proc. 1960 Ann. Int. Conf on High Energy Physics at Rochester* (University of Rochester, New York, 1960), p. 578.
20. J.G. Learned, private communication.
21. K. Greisen, see Ref. 16.
22. J.G. Learned, *2nd Int. Workshop on Neutrino Telescopes*, Venezia, February 1990.
23. F. Reines and J.P.F. Sellschop, see Ref. 17.
24. F. Reines and L. Price, *Proc. Workshop on Particle Astrophysics: Forefront Experimental Issues*, p. 328. © World Scientific Publishing Company.
25. S. Weinberg, *The First Three Minutes*, p. 155. © 1977 by Steven Weinberg. Reprinted by permission of Basic Books, Inc., a division of HarperCollins Publishers.
26. G. Gamow, *The Creation of the Universe* (Viking Press, New York, 1952), p. 61.
27. A.S. Eddington, *The Expanding Universe* (Cambride University Press, Cambridge, 1933), p. 13. (Reprinted in 1987 in Cambridge Science Classics.)
28. R.A. Alpher and R.C. Herman, *Nature* **162**, 774, 1948.
29. S. Weinberg, see Ref. 25, p. 131.
30. S. Weinberg, see Ref. 25, p. 132.
31. D.N. Schramm and G. Steigman, *Scientific American*, June 1988, p. 44.
32. V.F. Shvartsman, *JETP Letters* **9**, 184, 1969.
33. G. Steigman, D.N. Schramm and J.E. Gunn, *Phys. Lett.* **66B**, 202, 1977.
34. J. Yang *et al*, *Astrophysical J.* **281**, 493, 1984.
35. S. Weinberg, see Ref. 25, p. 118.
36. G. Gelmini, *Neutrinos*, ed. H.V. Klapdor, p. 312. © Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1988.

第8章

1. M. Koshiba, *Physics Today*, December 1987, p. 42.

訳者あとがき

“幽霊粒子”，“謎の粒子”のニックネームを持つニュートリノは，ベールで身を隠しその正体を明かさないがゆえに研究者を魅了してきた．そして，「ニュートリノ研究とはなにも検出されないことから，多くのことを学ぶ学問である」と本書で述べられているように，ニュートリノの正体不明性をいかにして素粒子物理学の枠組みに取入れるかが，これまでの素粒子物理学の発展の基盤にあった．ニュートリノは素粒子物理学の創成期から現代に至るまでの発展の主役を演じてきたと言っても過言ではない．さらに，現代の素粒子標準理論は完全ではなく，より包括的な大統一理論や超大統一理論の構築が必要とされている．ニュートリノの役割は益々重要になる．

本書はニュートリノの誕生に始まり，1990 年頃までまさに一貫して正体不明をつらぬいたニュートリノに関する研究の紹介である．しかし，単なる紹介ではなく，巧みな手法で読者を研究現場に誘い込む．読者は知らないうちに，その研究現場に居合わせているかのような錯覚に陥る．特に，当時の研究者の会話や手紙，逸話の挿入は，臨場感をかもし出す効果満点である．一般読者のみならず，研究者も十分楽しめる書物となっている．また，本書に数式やデータを加味すれば大学生に対する素粒子物理学入門の教科書に活用できる．

本書は 1992 年に刊行されたため，当然のことながらその後のニュートリノ振動現象の発見（ニュートリノ質量の発見），太陽ニュートリノ欠損問題の解決，地球ニュートリノの発見等のニュートリノ研究の急展開については記述されていない．これらは，適宜，訳者注で紹介した．しかしながら本書

には，1992年当時の今後のニュートリノ物理学やニュートリノ天文学の展開の予想がいたるところで記述されている．大方の研究者の予想が当たっているものもあれば，はずれたものもある．科学研究の展開を予測することの難しさを目の当たりに見て取れることが，本書のもう一つの楽しみでもある．

カミオカンデにおける超新星爆発ニュートリノの初検出と太陽ニュートリノ検出の成功によるニュートリノ天文学の創始，スーパーカミオカンデにおける大気ニュートリノ振動現象の初検出によるニュートリノ質量の発見，K２K実験における初の人工ニュートリノ長基線振動実験の成功，カムランドによる原子炉反ニュートリノ振動現象の初検出，スーパーカミオカンデやカムランドによる30年に及ぶ謎“太陽ニュートリノ欠損現象”の解決，カムランドにおける地球ニュートリノの初検出とニュートリノ地球科学の創始，名古屋大学グループのタウ・ニュートリノの初検出など，ここ20年間のニュートリノ研究の進展は目覚しく，日本の研究者が大健闘し，日本がニュートリノ研究のメッカになっている．そして，これらのニュートリノ研究の成果から，ニュートリノは少しだけ正体不明ではなくなってきた．本書によってニュートリノに興味を抱き，今後のニュートリノ研究を担う若い人達が多く出てくれることを願っている．

本書の訳を引き受けてから長年の歳月が流れた．これまで辛抱強く待って下さった出版社の多くの方々に，ここで厚くお礼申し上げる次第である．

2007年初春　鈴木厚人

人名索引

事項索引

著　者

C. サットン（Dr. Christine Sutton）
Department of Physics
University of Oxford

訳　者

鈴木　厚人（すずき　あつと）
1946 年生
高エネルギー加速器研究機構長，東北大学名誉教授
専門：素粒子物理学
著書：『ニュートリノと重力波』（裳華房，共著），Physics and Astrophysics of Neutrinos（Springer，共著）

ニュートリノでめぐる素粒子・宇宙の旅　　定価（本体 **3,800** 円＋税）

発　行　2007 年　4 月　9 日
著　者　C. サットン
訳　者　鈴木　厚人
発行者　深田　良治
発行所　シュプリンガー・ジャパン株式会社
〒102-0073　東京都千代田区九段北 1 丁目 11 番 11 号　第 2 フナトビル
TEL（03）6831-7005（営業直通）
印刷所　平河工業社

ISBN 978-4-431-70996-1　C3042　　http://www.springer.jp